



# Capítulo 7

## Frecuencias naturales y resonancias

## *Temas:*

- E1** Reconocer resonancias
  - E1** Pruebas de resonancias
    - o Pruebas de impacto
    - o Pruebas de arranque y paro
    - o ODS y Modal (secciones separadas)
  - E1** Pruebas de canal cruzado y tipos de datos

Este capítulo se basa en el capítulo anterior y analiza técnicas prácticas de prueba para diagnosticar y detectar condiciones de resonancia. Las pruebas incluyen arranque y paro, pruebas de impacto y pruebas de martillo calibrado. Al realizar estas pruebas, algunos tipos de datos en particular se analizan. También se tratan en esta sección y, a continuación, se amplían en las dos secciones siguientes sobre análisis modal y ODS.

## ¿Cómo puede usted saber si tiene un problema de resonancia?

Sin hacer ninguna prueba especial, hay dos maneras básicas de saber si usted tiene problemas de resonancia: fallas mecánicas inusuales, y signos reveladores en el espectro.

### **Fallas inusuales**

Si usted tiene fallas de maquinaria o fallas estructurales que parecen ser resultado de fatiga y usted no tiene ninguna otra explicación, entonces usted debe considerar la resonancia como una posible causa. Las estructuras deben durar mucho tiempo, y las fallas de fatiga sólo deben ocurrir después de muchos años de servicio. Algunos ejemplos de modos de falla son:

- FO Soldaduras rotas
- FO Tuberías agrietadas y con fugas
- FO Fallo prematuro de la máquina
- FO Ejes rotos o agrietados
- FO Grietas en la fundación

En el siguiente ejemplo, la alta vibración debida a la resonancia hizo que el riel de mano se desgastara tan lentamente.



Figura 7-1(Imágenes de Simon Huricks, Genesis Power, NZ)

### **Señales características en el espectro:**

Hay cuatro señales características:

- Picos inusualmente altos en el espectro.
  - o Los picos se amplifican
- Vibración direccional.
  - o Altos niveles de vibración en una dirección/eje pero no en otro.
- “Montañas” y “jorobas”
  - o Las áreas del espectro donde el piso de ruido, y cualquier pico en las cercanías, parecen haber sido levantados.
- Cambios en la amplitud con cambios en la velocidad
  - o Resonancias sólo excitadas bajo ciertas condiciones

Debido a que las resonancias amplifican la vibración, los picos en el espectro que normalmente pueden ser bastante bajos (en la frecuencia de paso de álate, o la frecuencia de engranaje, etc.) pueden aumentar dramáticamente. Cuando vea un pico alto, recuerde considerar la posibilidad de que esté siendo amplificado por una resonancia.

Si tiene una máquina de velocidad variable, puede observar que cuando la máquina está operando a su velocidad más alta, la frecuencia de paso de álate puede coincidir con una frecuencia natural, por lo que la máquina resuena, y los picos de frecuencia de paso de álate aumentarán en amplitud. Sin embargo, también puede observar que cuando está operando a una velocidad más baja, la frecuencia de paso de álate estaría por debajo de la frecuencia natural, por lo que la amplitud caería a niveles “normales”, y la máquina no estará en resonancia.

Además, cuando estudie la estructura más de cerca, notará que la masa, rigidez y amortiguación pueden ser muy diferentes vertical, horizontal y axialmente. Por lo tanto, puede haber una resonancia en la dirección horizontal (es decir, está vibrando de lado a lado), pero no tan verticalmente (habrá frecuencias naturales, pero es posible que no estén excitadas). En el caso de las bombas verticales, sin embargo, las resonancias pueden existir con bastante frecuencia radialmente, pero no a la misma frecuencia verticalmente (axialmente a lo largo de la máquina).

### **“Jorobas” y “montañas”**

Como acabamos de ver, cualquier vibración que coincide con una frecuencia natural, será amplificada. Y, como acabamos de ver, no tiene que calzar perfectamente. En la Figura 7-2 usted puede ver la “joroba” en el espectro entre 30 y 65 Hz. Parece que el pico a 3X se amplificó.

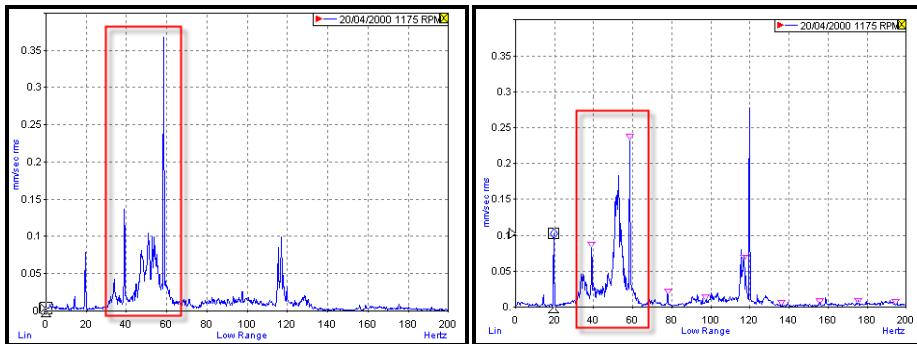


Figura 7-2

Los datos de arriba vienen de una bomba vertical de la imagen de abajo. Puede ver la foto de la máquina instalada de donde se instalaron los datos, así como una máquina vieja que había fallado (Figura 7-3).



Figura 7-3

## Pruebas especiales para identificar frecuencias naturales

Si sospecha que una máquina está resonando, pero necesita entender mejor la situación antes de intentar una corrección, entonces hay algunas pruebas que puede realizar que mostrarán dónde se encuentran las frecuencias naturales, y le dará una indicación de cómo la máquina/estructura se está moviendo.

Para entender las resonancias, necesitamos “excitarlas” – debemos inyectar energía en todas las frecuencias o sólo en las frecuencias de interés y ver cómo responde la estructura. Existen

múltiples frecuencias naturales en todas las estructuras. Si los excitamos podemos ver dónde están. Discutiremos varias maneras de realizar esta función.

Nota: Recuerde que las máquinas se mueven en tres ejes. A menos que ya sospeche que el problema está predominantemente en una dirección (por ejemplo, el motor/bomba se mueve de lado a lado), entonces usted debe realizar estas pruebas mientras se recopilan datos en dos o tres ejes.

Nota: Al intentar excitar resonancias, tenga en cuenta la posible ubicación de los nodos. Al realizar estas pruebas, debe tener cuidado de no inyectar energía en un punto nodal (por ejemplo, durante las pruebas de impacto), o medir la vibración en un punto nodal, ya que no habrá vibración que medir. Si se siente a lo largo de la estructura, a menudo puede saber dónde se encuentran los nodos. Puede hacer lo mismo con un acelerómetro mientras observa el colector en modo tiempo real.

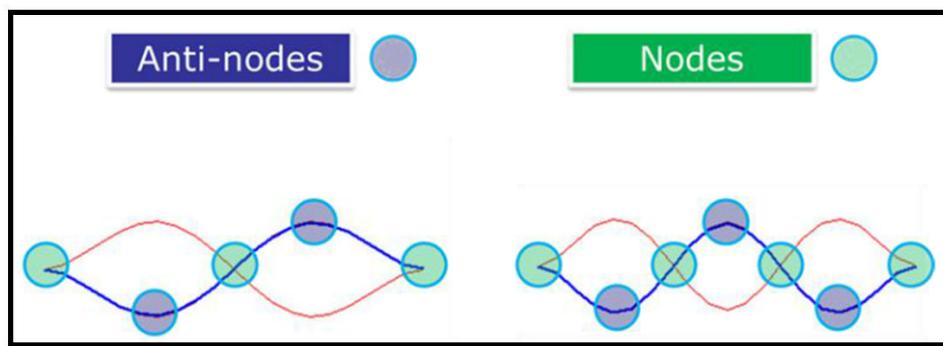


Figura 7-4

## Cambio de la velocidad de operación

Podemos utilizar la propia máquina para inyectar energía de vibración en la máquina y la estructura. Si es posible cambiar la velocidad de una máquina, establezcala a su velocidad más alta y reduzca lentamente la velocidad mientras observa los niveles de vibración en el espectro. Si es posible, utilice la función de promedio de retención de pico para que solo se mantengan las amplitudes máximas.

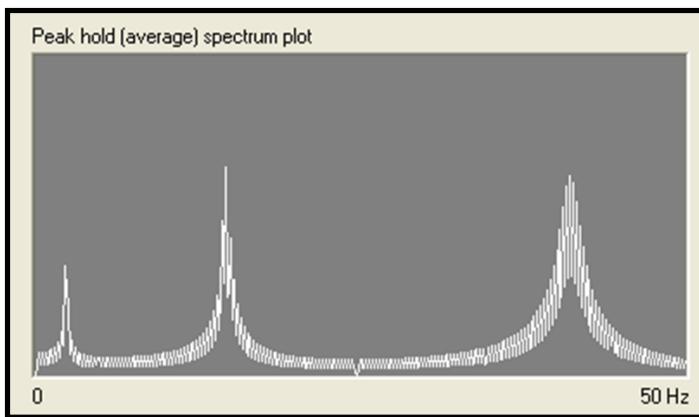


Figura 7-5

En el ejemplo anterior (Figura 7-5) pudimos hacer un barrido a lo largo del rango de velocidades. En el ejemplo abajo, la velocidad no se puede cambiar en un rango tan amplio de velocidad. Mientras que pudimos determinar la presencia de una frecuencia natural, más información hubiera sido útil.

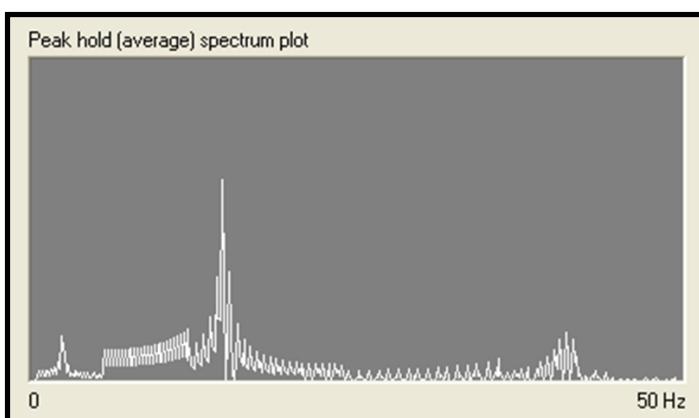


Figura 7-6

## Prueba de impacto

Si golpeara una máquina con un pedazo grande de madera, se inyectaría energía en la estructura en todas las frecuencias. ¿Por qué es así? Si usted fuera a mirar un espectro de un impacto, en lugar de ver los picos tradicionales, vería que la amplitud a través de todo el rango de frecuencia se eleva. Eso significa que todas las frecuencias naturales resonarán, amplificando la energía a esas frecuencias.

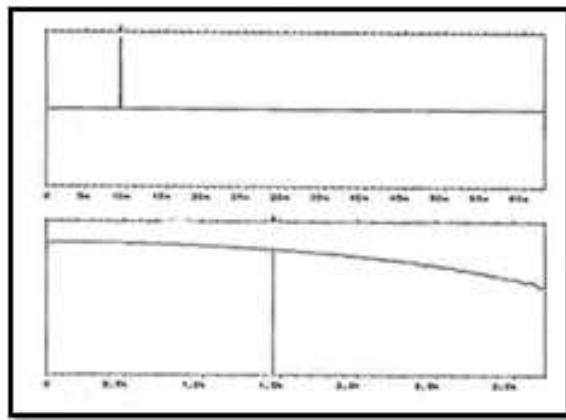


Figura 7-7

Por lo tanto, si detiene la máquina, configura el colector de datos en modo de retención de pico (20 promedios), inicia la recopilación de datos y golpea inmediatamente la máquina de nuevo, las frecuencias naturales se excitarán, y por lo tanto el recopilador de datos registrará los niveles de vibración en todas las frecuencias.

Tenga en cuenta que cuando golpee la máquina, vibrará durante un tiempo muy corto (dependiendo de la amortiguación). Por lo tanto, si utiliza 800 líneas, auto-ranging y un  $F_{\max}$  bajo, entonces la medida tomará demasiado tiempo. La resolución no es importante, así que seleccione un rango de frecuencia más alto ( $F_{\max}$ ), una medición de resolución más baja (400 líneas o incluso más baja), y si es posible, establezca un ajuste de ganancia adecuado y desactive el rango automático.

También puede hacer esto con la máquina en funcionamiento, pero debe tener mucho cuidado de no dañarse a sí mismo o a la máquina, y necesita impactar a la máquina con la fuerza suficiente para medir el aumento de la amplitud de vibración.



Figura 7-8

Tenga en cuenta que una prueba de impacto no siempre excitará todas las frecuencias, y el diseño de la máquina y la estructura afectará a los resultados considerablemente.

El acto de golpear la máquina, y la herramienta utilizada para golpear la máquina (un pedazo de madera sugerido anteriormente), es una ciencia en sí misma. Hay martillos especiales que puede comprar para esta prueba. Verá, si golpearas la máquina con una pieza de metal, se introducirá más energía a frecuencias más altas, menos a frecuencias más bajas (y puede dañar la máquina). Lo contrario es cierto para los elementos blandos. Se utiliza un mazo de goma; es posible que no inyecte suficiente energía a las frecuencias más altas. Esto se examina más adelante en el capítulo de análisis modal.

El objetivo es inyectar suficiente energía para excitar las frecuencias naturales en el rango de frecuencias de interés (el rango donde su máquina genera frecuencias, o el rango donde sospecha la resonancia). Si tuviéramos que golpear nuestra barra voladiza, podríamos obtener un gráfico como el que se muestra a continuación. Puede ver claramente dónde se encuentran las frecuencias naturales. A continuación, compararía este gráfico con un espectro normal para ver si alguno de los picos dominantes coincide.

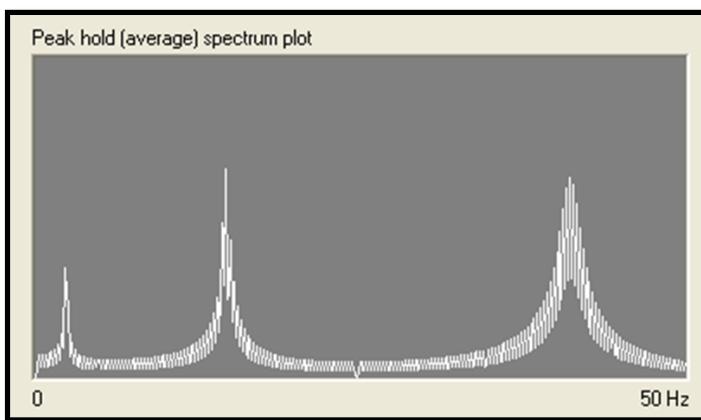


Figura 7-9

### ***Uso de un promedio negativo (de resta)***

En lugar de usar el promedio de retención máxima al realizar la prueba de impacto, puede utilizar un método conocido como “promedio negativo (o de resta)”. Si es compatible con su analizador, esta puede ser una herramienta muy eficaz. Hay dos etapas para este método de prueba.

#### **Primera fase**

Cuando esté listo para comenzar la prueba, inicie el “modo de promedio negativo” en el analizador.

Ahora golpee la máquina varias veces mientras la máquina está en funcionamiento. El analizador grabará la vibración normal de la máquina y la respuesta a ser golpeado.

### Segunda fase

En la segunda fase de la prueba se sigue registrando la vibración, sin embargo, ahora no se golpea la máquina. El analizador grabará la vibración normal de la máquina sin la vibración relacionada con la respuesta de la máquina al impacto.

A medida que el analizador registra la vibración “normal”, es capaz de restar la nueva vibración de la vibración antigua que incluía la respuesta a ser golpeado. La diferencia entre los dos conjuntos de datos es la respuesta a ser golpeado; se eliminan todas las fuentes 1X, 2X y otras fuentes de “vibración normal” para la máquina.

Si se realiza correctamente, la medición puede ser bastante eficaz para revelar las frecuencias naturales en la máquina. Por supuesto, no prueba la existencia de las resonancias; necesitamos ver el cambio de fase para estar seguros, pero es un indicador muy bueno.

## Pruebas de arranque y paro

---

Si puede controlar la velocidad de la máquina a medida que se acelera o a medida que se reduce la velocidad de funcionamiento, a medida que la máquina se ralentiza/acerla, puede buscar las resonancias características.

Por ejemplo, si intenta una prueba de paro, a medida que la velocidad de la máquina disminuye, la vibración de velocidad de funcionamiento o la vibración a alguna otra frecuencia (por ejemplo, 2X, paso de aspas, etc.), puede coincidir con una de las frecuencias naturales, y resonará. Verá el aumento de amplitud.

Si la máquina llega a la velocidad demasiado rápido (o se detiene demasiado rápido), entonces usted no tendrá tiempo para colectar datos suficientes, ni habrá suficiente tiempo para excitar las resonancias. Como se describió anteriormente, debe configurar el recopilador de datos para tomar medidas rápidamente: opte por espectros de menor resolución.

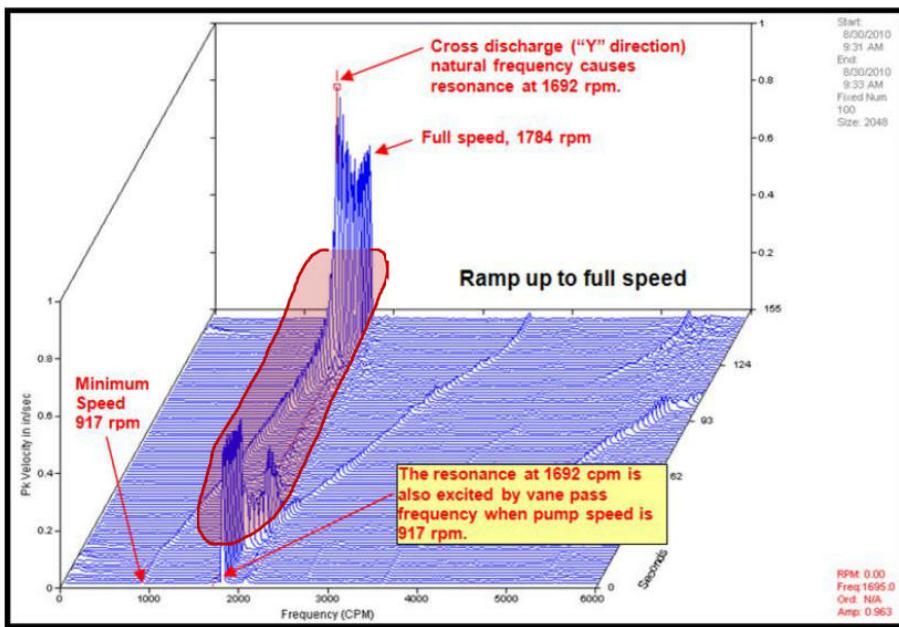


Figura 7-10 Diagrama de cascada

Puede utilizar el promedio de retención de picos, pero mejor aún debe utilizar una gráfica de cascada (a menudo denominado trazado en cascada o mapa espectral). Mientras que estamos familiarizados con los gráficos de cascada que muestran espectros individuales de diferentes fechas, en este caso los espectros se colectan unos segundos de diferencia (o más, dependiendo de la tasa de cambio de velocidad).

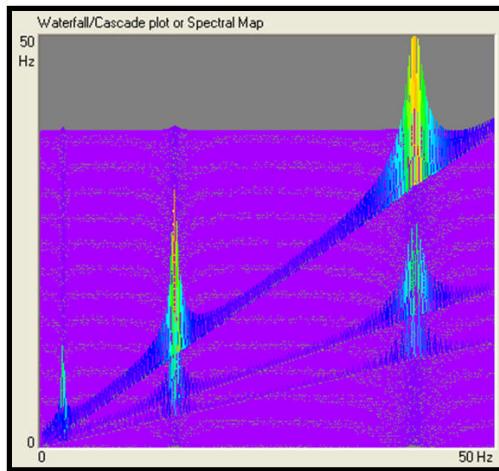


Figura 7-11

Hay dos características interesantes. Las tres líneas de picos que sobresalen son el resultado de un pico fuerte a 1X, 2X y 3X en la vibración de la fuente. A medida que aumenta la velocidad de la máquina, los picos 3X excitan el primer modo (y se amplifica), luego a medida que se mueve hacia fuera el 2X se mueve, y finalmente la frecuencia 1X excita el primer modo.

Puede ver las tres regiones en el gráfico para ver claramente dónde existen las resonancias. Incluso cuando las frecuencias dominantes de la máquina no coinciden con una frecuencia natural, otras fuentes de vibración, incluido el ruido, las excitarán.

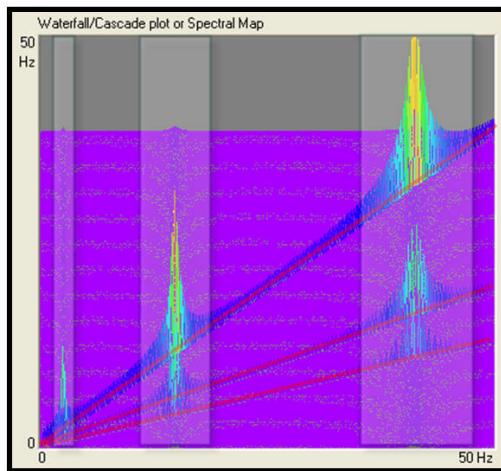


Figura 7-12

### ***Diagrama de Campbell***

Los mismos datos también se pueden presentar en un diagrama Campbell, que se puede encontrar en algunos paquetes de software. En esta gráfica, las frecuencias naturales pueden representarse como círculos y o la amplitud de vibración se puede indicar por color o intensidad de color.

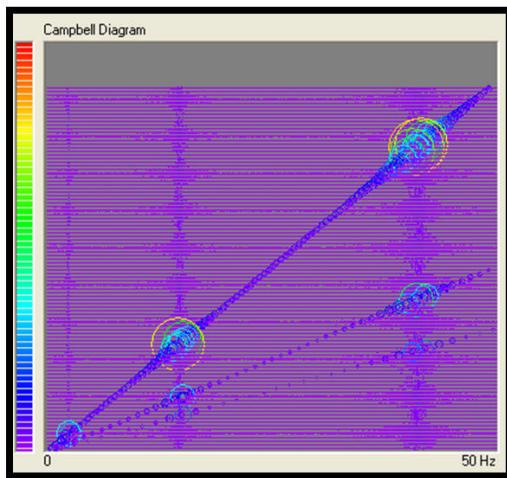


Figura 7-13 Diagrama de Campbell

### Seguimiento de órdenes

Si su recopilador de datos permite el seguimiento de órdenes, es una prueba que puede realizar mientras la máquina está aumentando o reduciendo la velocidad. El recopilador de datos tomará una señal de tacómetro una vez por revolución para conocer la velocidad de funcionamiento exacta. Extrae los datos de amplitud y fase a medida que se cambia la velocidad.

Si considera nuestros datos de cascada, es lo mismo que extraer la amplitud y la fase de la frecuencia 1X.

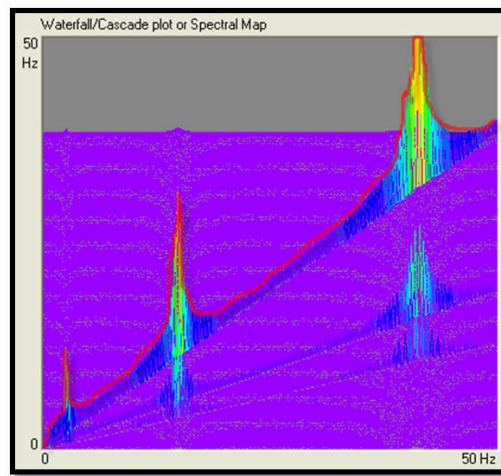


Figura 7-14

Los datos deben parecerse a la gráfica de Bodé que describimos anteriormente.

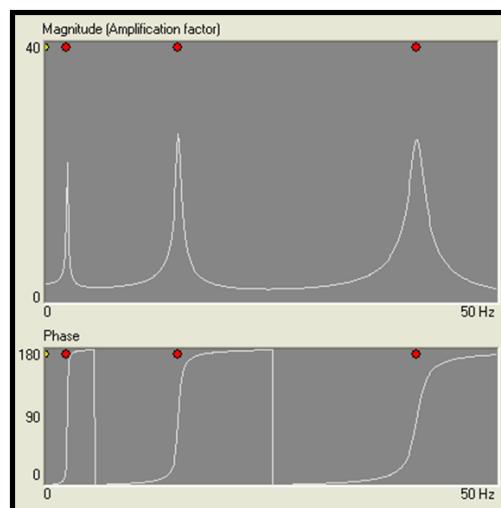


Figura 7-15

## Puntos clave

- FO Los estudiantes deben entender las diversas maneras de detectar la resonancia
  - o Picos inusualmente altos, direccionales en los espectros con jorobas debajo de ellos.
  - o Vibración que sube o baja significativamente con cambios en la velocidad
  - o Soldaduras rotas, tuberías con fugas, pernos agrietados y otros resultados de alta vibración
- FO Los estudiantes deben entender en detalle las diversas pruebas de resonancia, los distintos gráficos y la configuración del recopilador de datos asociada a ellos:
  - o Prueba de impacto, cambio de velocidad, pruebas de arranque y paro
  - o Tipos de promedios, ventanas, ajustes de ganancia, gráficas de cascada, diagramas de Campbell, seguimiento de órdenes, etc.

## Caso práctico: Motor de CC en una imprenta

Un motor de CC en una imprenta fue montado en una I-Beam. Los aisladores se utilizaron para suprimir las amplitudes de vibración, sin embargo, se registraron lecturas de alta vibración de >30 mm/seg o 1,7 in/sec, y cuando la máquina se apagaba la vibración aumentaba.

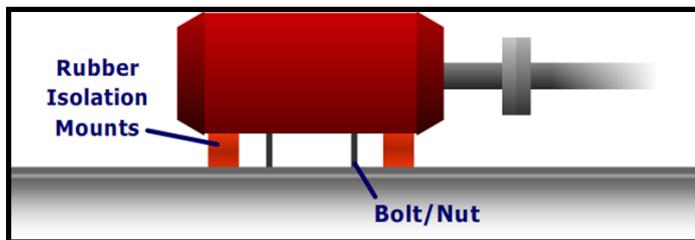


Figura 7-16

Se sospechaba que había una resonancia; de hecho, se sospechaba que los propios aisladores eran responsables.

Se realizó una prueba de paro. A como se reduce la velocidad, la amplitud se eleva tan alto como 45 mm/sec o 2.5 in/sec. Como se observa en la

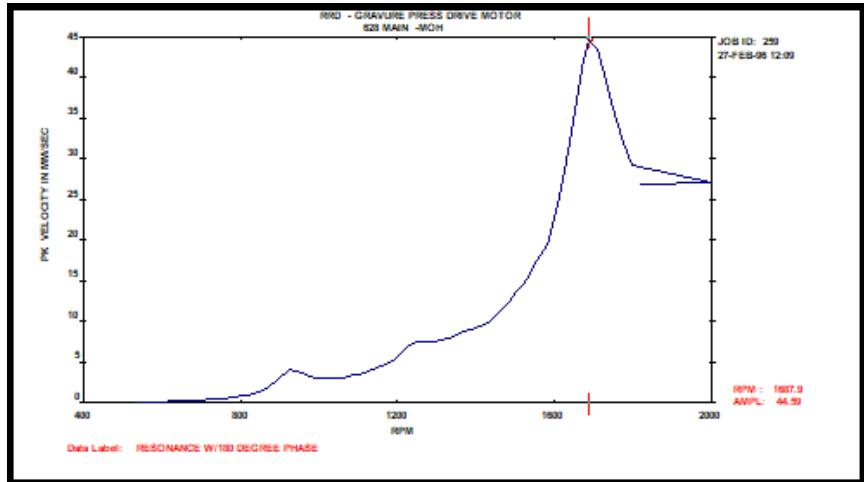


Figura 7-17, la amplitud aumentó y disminuyó rápidamente, sugiriendo la posibilidad de resonancia.

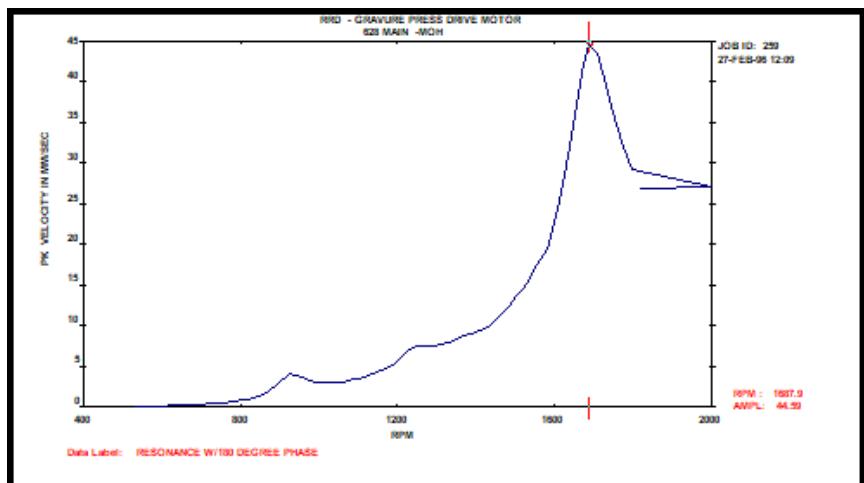


Figura 7-17

Cuando se estudiaron los datos de fase, estaba claro que estábamos tratando con una resonancia – se puede ver el cambio de fase de 180°.

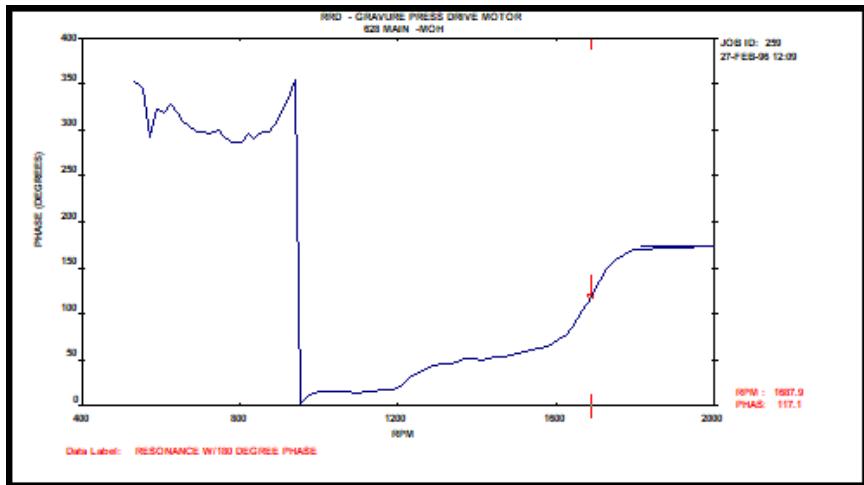


Figura 7-18

Los aisladores están diseñados como sistemas de un solo grado de libertad. Si se diseñan e instalan correctamente, harán que los niveles de vibración se reduzcan en gran medida, siempre y cuando la frecuencia de funcionamiento de la máquina esté sustancialmente por encima de la frecuencia natural del aislador. Parecía que la frecuencia natural de estos aisladores estaba demasiado cerca de la velocidad de funcionamiento de la máquina, ¡amplificando así la vibración!

Se realizó una prueba de impacto para comprobar los resultados. También indican la probabilidad de una resonancia alrededor de la velocidad de operación (tenga en cuenta el cambio en la escala de frecuencia).

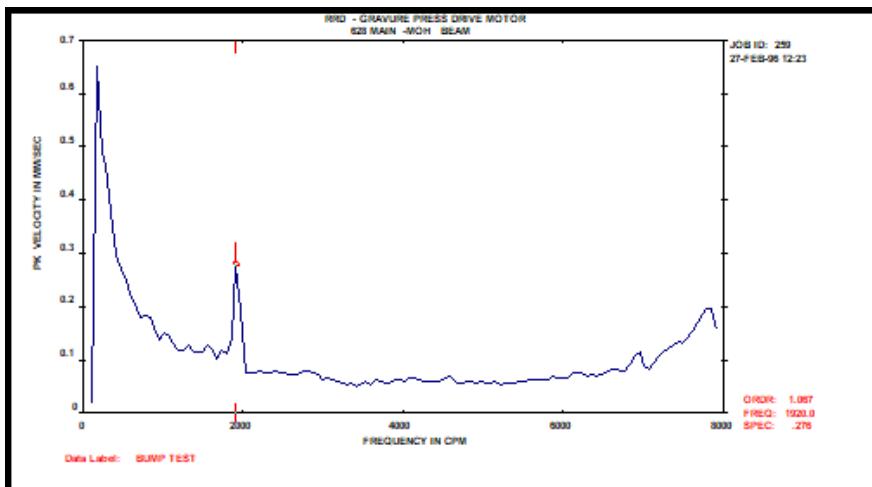


Figura 7-19

Para contrarrestar el efecto amplificador de los aisladores, se añadieron derivaciones a la máquina; descargando pernos entre la parte inferior del motor y la viga I de soporte.

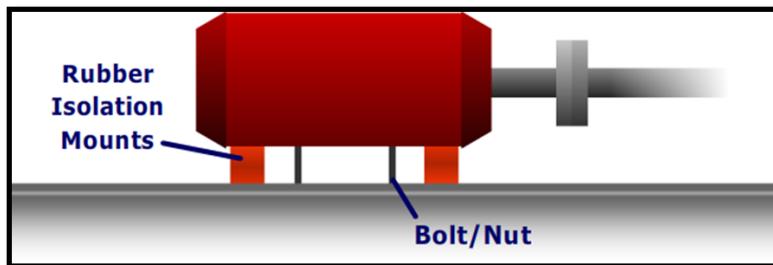


Figura 7-20

La prueba de paro se repitió y se registraron lecturas de vibración dramáticamente más bajas.

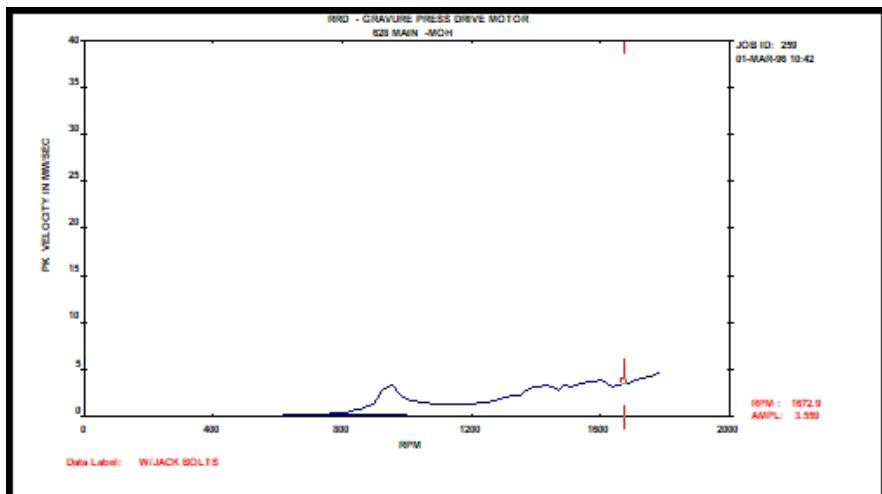


Figura 7-21

La amplitud máxima es ahora de solo 3.5 mm/seg, o 0.2 in/seg.

## Análisis visual

Podemos tomar lecturas de vibración tradicionales para medir el movimiento y utilizar software para animar el movimiento, o podemos utilizar técnicas visuales:

- Luces estroboscópicas
- Cámaras de muy alta velocidad
- Vibrometría láser
- Amplificación de movimiento a partir de vídeo normal

- Postprocesamiento de vídeo para resaltar el movimiento

## Mediciones a canal cruzado

---

Hasta ahora hemos utilizado amplitud y fase en la gráfica de Bodé solamente. Las lecturas de fase se basaron en una referencia de tacómetro en la máquina. Un analizador de un solo canal se puede utilizar para adquirir los datos con bastante facilidad (aunque la cinta reflectante normalmente debe agregarse al eje), sin embargo, la limitación principal es que los datos de fase sólo están disponibles a la velocidad de funcionamiento de la máquina. Al crear gráficas de Bodé (pruebas de arranque o paro) la amplitud y la fase 1X son suficientes, pero cuando echamos un vistazo de cerca al análisis de la forma de desviación operativa (ODS) y al análisis modal, mediciones multicanal que proporcionan valores de amplitud y fase en todas las frecuencias serán necesarias.

Ahora examinaremos más de cerca las mediciones entre canales.

Las mediciones multicanal más comunes incluyen:

- Fase a canal cruzado
- Función de transmisibilidad o respuesta de frecuencia
- Coherencia
- Órbitas (discutiremos las órbitas por separado)

### ***Comprendiendo las mediciones a canal cruzado***

Cuando se realiza un cálculo FFT, el resultado es tanto un espectro de amplitud como un espectro de valores de fase. Por ejemplo, si el espectro tenía 800 valores (800 LOR), también habrá 800 valores de fase. En muchas aplicaciones de monitoreo de vibración de maquinaria, el FFT se calculó a partir de una sola forma de onda. Los valores de fase se hacen referencia al inicio de la forma de onda de tiempo, sin embargo, debido a que la forma de onda de tiempo no se activó no hay ninguna referencia. Como resultado, los valores de fase no tienen sentido.

Nota: se han realizado algunos estudios que sugieren que estos valores de fase pueden ser realmente de algún valor, pero ese no es el tema de este capítulo.

Dado que los valores de fase no son relativos a una referencia significativa, se descartan. Sólo guardamos los valores de amplitud.

Sin embargo, si recopilamos dos formas de onda de tiempo simultáneamente y realizamos el cálculo FFT en ambos registros de tiempo, podemos usar los valores de fase de ambos registros. Los valores de fase son relativos entre sí. Por ejemplo, si el valor de fase en 1X en el canal “1” es de 23° y el valor de fase a 1X en el canal “2” era de 113°, entonces se podría decir que la vibración a la velocidad de operación estaba fuera de fase 90° entre el canal “1” y “2”. Los valores de 23° y 113° no tienen sentido por sí solos.

## ***Aplicaciones de fase a canal cruzado***

Cuando discutimos el análisis de fase, aprendimos que la forma más fácil de recopilar las lecturas de fase era utilizar la fase a canal cruzado. Sin embargo, en ese caso sólo usamos la fase a la velocidad de operación – estábamos tratando de diagnosticar el desbalance, desalineación, etc. Cuando recopilamos la fase con canal cruzado, en realidad tenemos un espectro completo de lecturas de amplitud y fase. Hasta aquí no hemos tenido una aplicación para estos datos, sin embargo, cuando hablamos de ODS y análisis modal utilizaremos estos datos. La diferencia es que estudiaremos la fase de canal cruzado y amplitud.

## ***Pruebas de respuesta de fuerza***

Al estudiar los datos de fase de una máquina, estamos midiendo la respuesta de la estructura a las fuerzas internas que son el resultado del giro del eje (y el desbalance y desalineación residual, etc.), el engrane, elementos rodando (en los rodamientos), paletas y álabes siendo empujadas a través de algún medio, etc. De hecho, cuando realizamos análisis de fase y colectamos amplitud y fase de 1X, realmente sólo estamos mirando la respuesta de la máquina a las fuerzas 1X: desbalance, desalineación, eje doblado, etc.

Sin embargo, no tenemos forma de saber cuánta fuerza se utilizó para generar esa respuesta. Por lo tanto, al realizar análisis de fase y ODS, sólo podemos medir cómo vibra la máquina debido a las fuerzas internas.

Hay mucho más que podríamos aprender si también pudiéramos medir la fuerza que se utilizó para generar la respuesta. A continuación, podríamos comparar la salida con la entrada – la respuesta debido a la excitación. Podemos utilizar mediciones de dos canales como la Función de Respuesta de Frecuencia y la Transmisibilidad para comparar la respuesta a la excitación, y podemos utilizar la correlación cruzada y la coherencia para comparar la respuesta a la excitación con el fin de comprobar la validez de la prueba.

Martillos de fuerza o agitadores se pueden utilizar para introducir una cantidad conocida de fuerza en el sistema.



Figura 7-22 Martillo de fuerza y agitador

### ***Transmisibilidad y FRF***

Desde un punto de vista matemático podemos utilizar el término transmisibilidad y función de respuesta de frecuencia (FRF) indistintamente. Ambos son una relación de la salida a la entrada.

- FO La transmisibilidad a menudo se muestra en una escala lineal, pero se puede mostrar en una escala logarítmica. La transmisibilidad se utiliza normalmente para comparar dos señales de vibración, es decir, dos sensores montados en una máquina. Indica cómo se compara la vibración en la posición 2 con la vibración en la posición 1. Como veremos, se utiliza en las pruebas ODS con un sensor mantenido en una ubicación de referencia mientras que otro sensor se mueve alrededor de la máquina o estructura.
- FO La función de respuesta de frecuencia se utiliza normalmente cuando se compara la vibración en un punto debido a una entrada medida de vibración (o fuerza) en otro punto. Se utiliza para medir la respuesta de la estructura a la excitación de entrada. FRF se grafica normalmente en una escala logarítmica.

Se calculan de la misma manera; la salida dividida por la entrada.

(De hecho, en el mundo de la electrónica utilizan el término Función de transferencia para el mismo cálculo. En el mundo de la electrónica se utiliza para comparar la señal eléctrica en un punto en comparación con la señal de entrada – condensadores, resistencias e inductores también crean resonancias y anti-resonancias).

FRF es la relación de la salida a la entrada. Si pudiéramos excitar una estructura en cada frecuencia con 1 unidad de vibración, y medimos 1 unidad de vibración en cada frecuencia, entonces el FRF sería el siguiente.

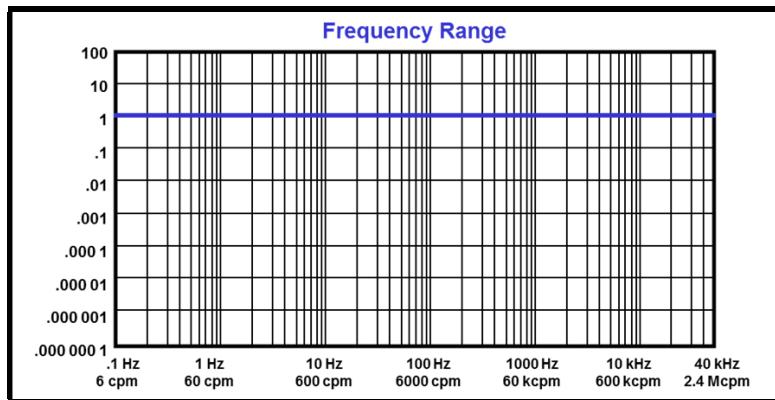


Figura 7-23

Cuando estudiamos acelerómetros y opciones de montaje (en la Categoría II) aprendimos que en ciertas frecuencias la respuesta se amplificaba (alrededor de la frecuencia natural) mientras que en otras frecuencias la respuesta se atenuaba (roll-off). Esta fue una medición de la función de respuesta de frecuencia.

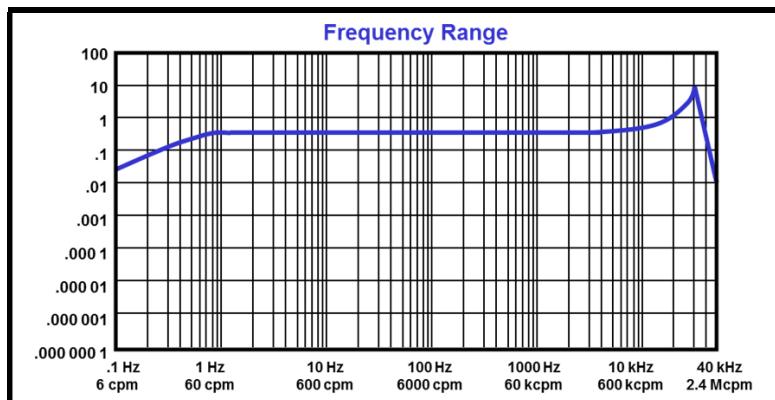


Figura 7-24

La relación se expresa a menudo en dB y se describe como 'ganancia'.

- 10 Log<sub>10</sub> (salida/entrada) – para señales de tensión
- 20 Log<sub>10</sub> (salida/entrada) – para señales de alimentación
  - o Log<sub>10</sub> (1) = 0
  - o Log<sub>10</sub> (10) = 1
  - o Log<sub>10</sub> (100) = 2
  - o Log<sub>10</sub> (.1) = -1
  - o Log<sub>10</sub> (.01) = -2

El mismo tipo de medida se puede colectar en una estructura en la que no medimos las fuerzas de entrada, como se indicó anteriormente, si la máquina está operando las fuerzas de entrada

proviene de la propia máquina. Pero todavía podemos comparar las amplitudes de vibración y la fase de toda la máquina o estructura con una ubicación de referencia para ver cómo se mueve una ubicación (cantidad de movimiento y dirección de movimiento) en comparación con otra ubicación.

Discutiremos esta técnica de prueba con mayor detalle en el capítulo ODS.

### ***Linealidad y coherencia***

Todos los cálculos de canal cruzado realizados en un analizador multicanal suponen que el sistema es “lineal”. Lo que eso significa es que si excitas una estructura con una fuente de vibración, toda la energía en todas las frecuencias se transmitirá a todos los demás puntos de interés sobre esa estructura. Sabemos que las resonancias harán que la vibración a ciertas frecuencias se amplifique o atenúe, sin embargo, si una estructura es no lineal significa que:

1. La energía de vibración no se transmite a todos los puntos de interés; ya sea porque los puntos no están conectados físicamente, o hay una grieta, holgura o alguna otra discontinuidad.
2. Si se duplicara la amplitud de vibración de entrada, la vibración en la salida no se duplicaría.
3. Si parte de la vibración medida no está relacionada con la entrada de vibración en el sistema. Por ejemplo, hay ruido eléctrico, vibración de otras máquinas, etc.

La mayoría de los sistemas mecánicos son “lo suficientemente lineales” para buenos cálculos de canal cruzado. Sin embargo, es importante probar la linealidad.

### ***La medición de coherencia***

La función de coherencia indica el grado de correlación entre la entrada y la salida de un sistema. Da un valor de 0 a 1 para cada frecuencia.

- Cuando la coherencia es 1, indica que en la frecuencia f todas las salidas del sistema se deben a la entrada.
- Cuando la coherencia es 0, indica que en la frecuencia f la salida del sistema es completamente independiente de la entrada.

Típicamente, un valor de coherencia aceptable será superior a 0.9 en un entorno de ruido de fondo bajo y por encima de 0.7 en un entorno de ruido de fondo alto.

La coherencia se calcula a partir del espectro cruzado entre las señales y los espectros de potencia para cada una de las dos señales. La fórmula de coherencia es la siguiente:

$$\gamma^2 = \frac{[\text{cross} - \text{spectrum}]^2}{\text{pwrSpectrumA} \cdot \text{pwrSpectrumB}}$$

La coherencia se utiliza para validar la integridad de las señales e identificar la fuente de vibración en presencia de muchas señales diferentes (de frecuencia similar).

La coherencia es una función promediada. A medida que aumente el número de promedios, el valor de la coherencia disminuirá. Por lo tanto, para la primera media, todos los datos son coherentes (coherencia = 1), por lo tanto, se requiere más de un promedio. Como regla general, utilice 4-10 promedios para los datos de coherencia.

La coherencia es una herramienta importante utilizada en el análisis modal. Si los datos no son coherentes, no es posible llegar a una conclusión sobre la respuesta de la estructura a la fuerza de entrada.

La coherencia también es importante en ODS. Suponemos que la vibración que medimos en el acelerómetro móvil se debe a las fuerzas generadas dentro de la máquina (y no de fuentes externas), y que la transmisibilidad entre el acelerómetro móvil y el acelerómetro de referencia no está comprometida. Si se sospecha que existen no linealidades, puede probar la coherencia y buscar físicamente grietas, huecos, etc.

### ***Pruebas de no linealidades***

Podemos utilizar dos acelerómetros, uno en el lugar de referencia y otro en el punto de interés, y realizar una prueba de coherencia. Idealmente, la coherencia sería '1' en todas las frecuencias. En este ejemplo, la coherencia es bastante pobre.

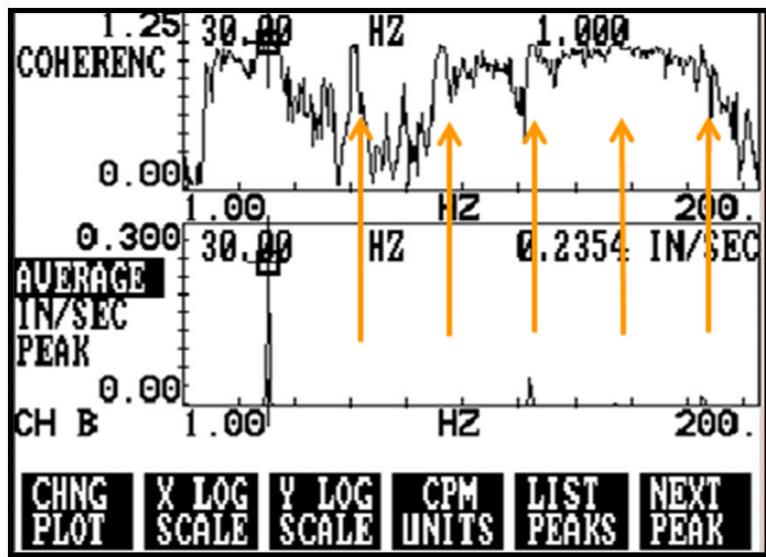


Figura 7-25

Es importante tener en cuenta que la coherencia siempre será baja cuando las amplitudes de vibración en sí mismas son bajas o ruidosas. Es difícil comparar dos fuentes de vibración a frecuencias específicas donde hay muy poca vibración para medir. Estamos intentando comparar la vibración en el punto B con la vibración con la misma frecuencia en el punto A. Si hay datos ruidosos o de muy baja amplitud, la correlación será muy baja, por lo tanto, la coherencia será baja.

### ***Uso de pruebas de impacto***

Otra forma de probar la coherencia es realizar una prueba de impacto. La idea es injectar una fuerza conocida y medir la respuesta. Necesitará un martillo modal instrumentado con la celda de carga, un acelerómetro de respuesta y un analizador de 2 canales.



Figura 7-26

La siguiente imagen muestra una buena linealidad (buena coherencia) entre el martillo y el acelerómetro.

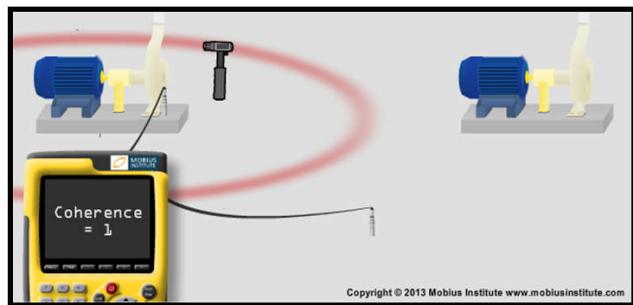


Figura 7-27 Buena coherencia

Una grieta en la base entre el lugar de prueba golpeado con el martillo y el acelerómetro resultaría en una mala coherencia (abajo).

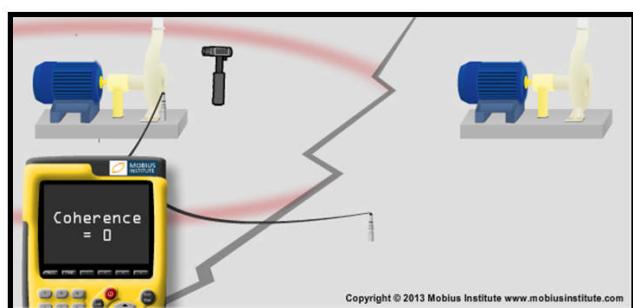


Figura 7-28 Coherence pobre

Si la grieta fuera más pequeña o no atravesara toda la distancia entre los dos sensores entonces habría cierta coherencia o alguna relación entre el martillo y el acelerómetro, pero no sería perfecta coherencia.

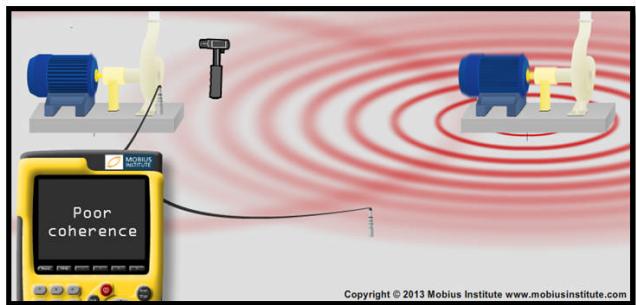


Figura 7-29 Vibración externa

La coherencia se puede reducir por la presencia de vibraciones externas. En este caso, no TODA la vibración en el acelerómetro es causada por o es el resultado del golpe del martillo. Parte de la vibración proviene de la otra máquina.

### **Conjunto de datos completo**

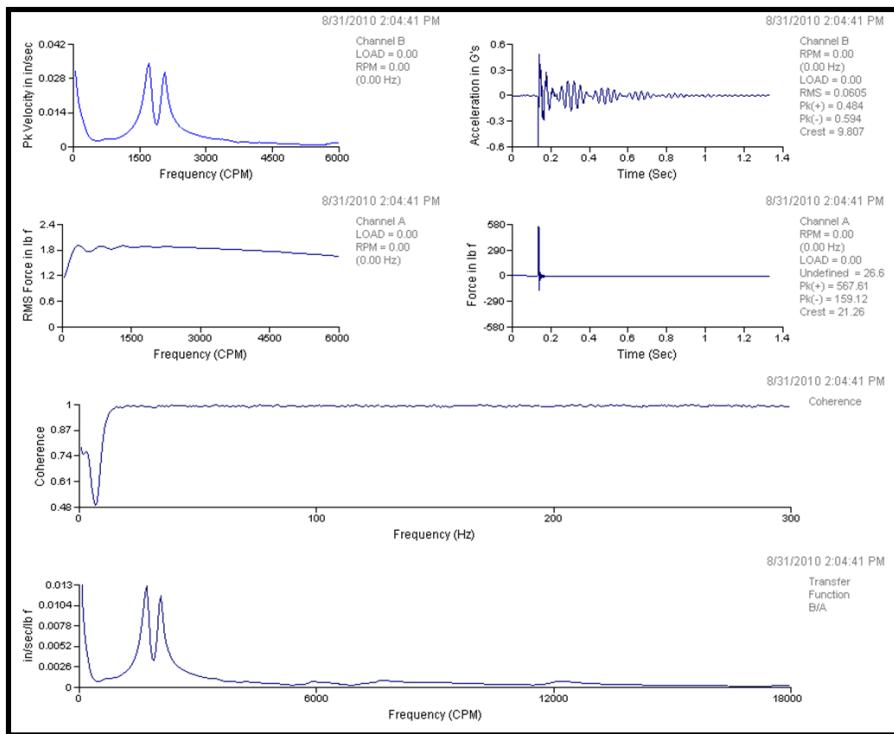


Figura 7-30 Conjunto completo de datos

Tome un momento para revisar la Figura 7-30 para que se asegure de comprender los conceptos y los datos que colectamos durante las pruebas de impacto con martillo de fuerza. También considere las configuraciones de los colectores de datos según lo visto en la sección de procesamiento de señales.

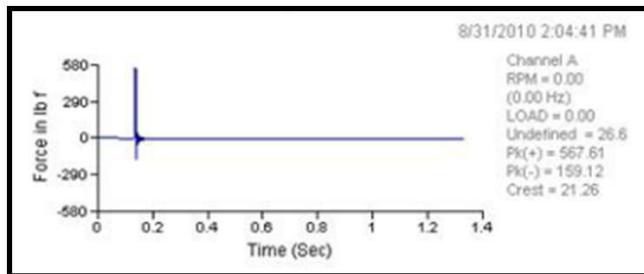


Figura 7-31 Forma de onda del martillo

La Figura 7-31 es la forma de onda del golpe del martillo. Usted va a utilizar una ventana de Fuerza si su colector de datos la soporta, o en su defecto una ventana rectangular. Utilice un 10% de pre disparo para asegurarse que el impacto esté cerca del inicio de la ventana de tiempo y utilice el manual para la configuración de la ganancia para evitar el recorte de la señal en el plano vertical. Cuando revise este diagrama, asegúrese que haya un solo impacto. Algunas veces el martillo puede rebotar e impactar dos veces sin usted notarlo.

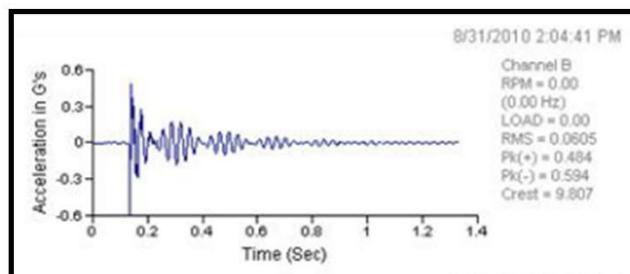


Figura 7-32 Forma de onda del acelerómetro

La Figura 7-32 muestra la forma de onda de la salida del canal del acelerómetro. Utilice una ventana exponencial (o rectangular si no la soporta) para este canal. Idealmente la forma de onda se amortiguará a cero antes del final del tiempo de colección. Asegúrese de que la ganancia se configuró correctamente para evitar que se corte la señal en el plano vertical.

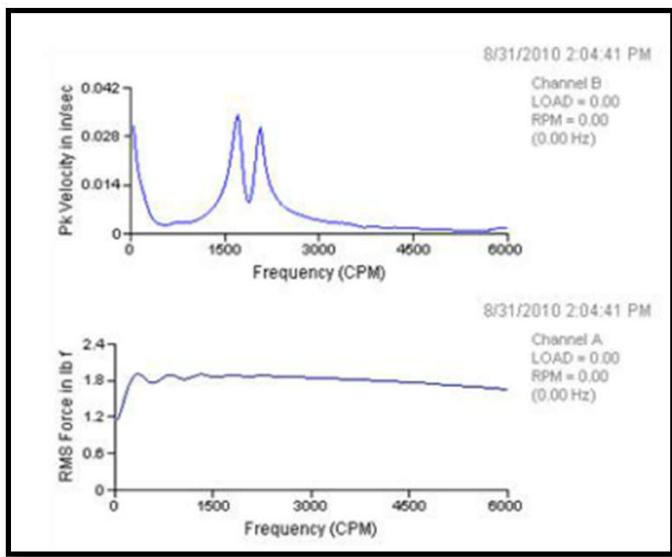


Figura 7-33 Espectro de canal de entrada y salida

En el diagrama inferior de la Figura 7-33 es el FFT del canal del martillo. Esto le permite ver las frecuencias inyectadas en la estructura. El diagrama superior es el espectro del canal del acelerómetro, o la respuesta al impacto.

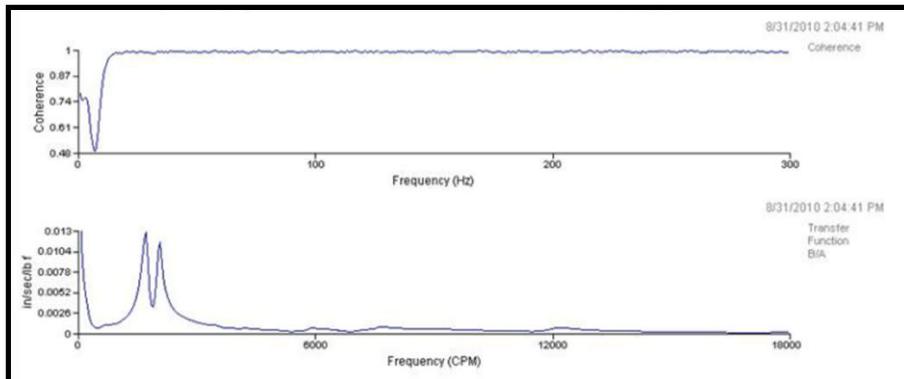


Figura 7-34 Datos de canal cruzado

La Figura 7-34 son diagramas calculados de mediciones con canal cruzado explicadas en esta sección. El diagrama superior es la coherencia. Note que es prácticamente plano y cercana a "1" en todas las frecuencias. Esto significa que hay una buena relación lineal entre la entrada y la salida, no hay doble impactos del martillo y los datos lucen válidos. Recuerde, la coherencia es un tipo de dato promediado lo que significa que hicimos de 4-10 impactos separados – viendo cada impacto en el diagrama descrito hace unos momentos.

La gráfica inferior es el FRF. Esta es la gráfica que nos interesa. Es la razón por la que estamos preparando esta prueba.

### Ejemplo de prueba de coherencia

En el ejemplo siguiente se realizó una prueba para determinar si hay no linealidad entre la placa del piso y los cimientos de hormigón.

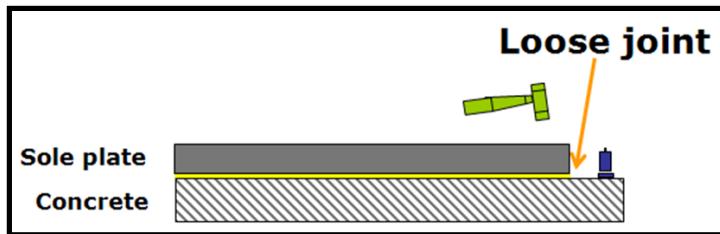


Figura 7-35

El analizador se coloca en modo de coherencia y la activación se configura para capturar el impacto y la respuesta.

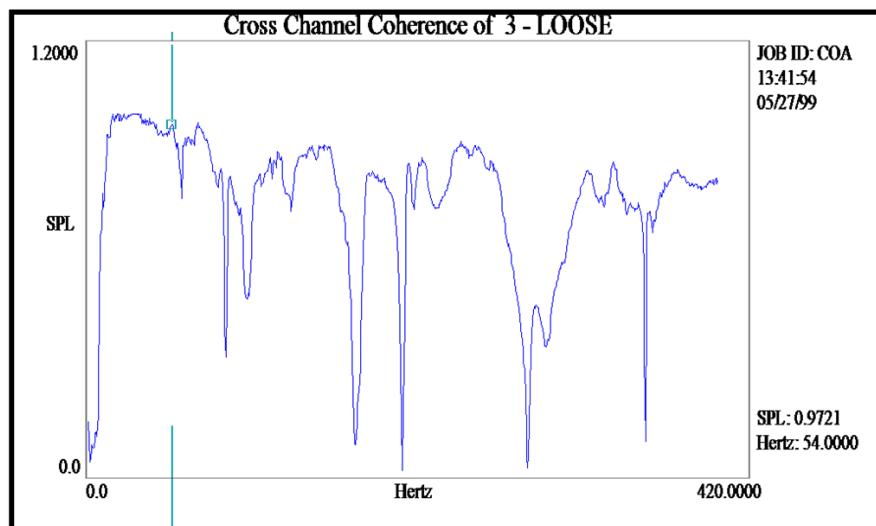


Figura 7-36

Podemos ver que la coherencia era bastante pobre. (Tenga en cuenta que el gráfico se escala a 1.20 y esperamos la coherencia de 10).

Un perno que sujetaba baña la placa de la suela a la base de hormigón se apretó a mano y la prueba se repitió.

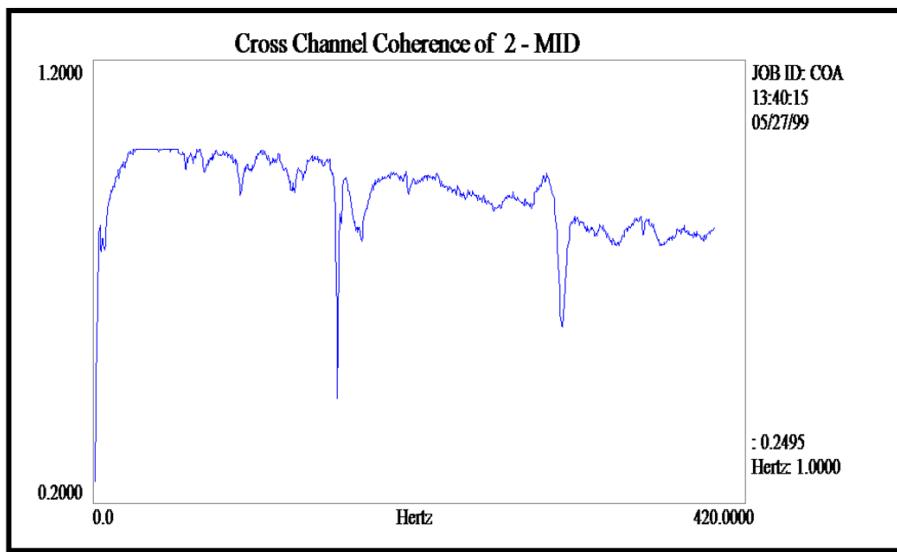


Figura 7-37

Puede ver que los resultados han mejorado. Y finalmente el perno se apretó correctamente y la prueba se repitió por última vez.

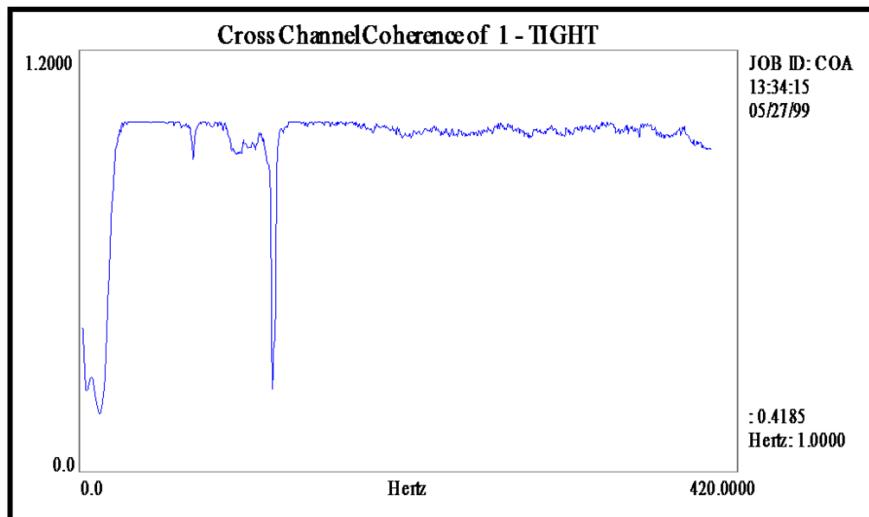


Figura 7-38

Puede observar una serie de factores:

- 1 La coherencia es '1 para la mayor parte del rango de frecuencia; por lo que hay buena linealidad.

2. La respuesta de baja frecuencia fue pobre. Eso podría estar relacionado con la mala respuesta de baja frecuencia del acelerómetro, o la capacidad del martillo para inyectar energía a esas bajas frecuencias, o podría haber habido ruido externo.
3. A 120 Hz hay una caída en la coherencia. Eso se debe al zumbido de 120 Hz (dos veces la frecuencia de línea en los EE.UU.) de las luces y otras fuentes. Debido a que el martillo no inyectó toda la vibración a 120 Hz que se midió en los cimientos, la coherencia es pobre.

La coherencia puede ser deficiente por varias razones:

- ☒ Nivel de señal bajo
- ☒ Puntos nodales estructurales
- ☒ Vibración de otras fuentes
- ☒ No linealidad
- ☒ Dobles golpes con martillo de impacto
- ☒ Sensor o cable defectuoso
- ☒ Montaje deficiente del sensor

A continuación, exploraremos la aplicación más común de mediciones multicanal en nuestra industria: ODS y análisis modal.

Las mediciones entre canales proporcionan muchos beneficios al analista de vibración. Aprenderemos a realizar mediciones de fase para mejorar nuestros diagnósticos. Aprenderemos a probar estructuras para encontrar resonancias.

## Puntos clave

- ☒ Los alumnos deben comprender los siguientes tipos de datos entre canales, incluido cuándo y cómo se utilizan.
  - Fase a canal cruzado
  - Función de transmisibilidad o respuesta de frecuencia
  - Coherencia
- ☒ Los estudiantes deben entender la diferencia entre la transmisibilidad utilizada en una prueba ODS y la FRF utilizada en una prueba modal.
- ☒ Los estudiantes deben entender la configuración del recopilador de datos asociada con estas pruebas
  - Promedios, ventanas, ajustes de ganancia, ajustes de disparo, etc.
- ☒ Los estudiantes deben estar familiarizados con el “conjunto de datos completo” y por qué uno quería ver todos estos gráficos
- ☒ Los estudiantes deben entender las causas de la mala coherencia