



Capítulo 4

Análisis de forma de onda de tiempo

Temas:

- E1** Introducción
 - E1** Resolución, frecuencia de muestreo y duración del registro
 - E1** Selección de las mejores unidades
 - E1** Patrones de forma de onda
 - E1** Análisis de formas de onda con espectros
 - E1** Soltura, daño a la correa/banda y cavitación
 - E1** Análisis de cajas de engranajes
 - E1** Diagramas circulares

En este capítulo se examina el análisis de vibraciones desde la perspectiva de la forma de onda de tiempo. En la Categoría II, los estudiantes se centran en el diagnóstico de fallas de la máquina en función de los patrones en el espectro de vibración. Las configuraciones del recopilador de datos y la presentación de datos también se centraron en optimizar el espectro. En este capítulo veremos los casos en los que analizar la forma de onda de tiempo como el tipo de datos principal es útil y discutiremos maneras de optimizar las configuraciones de recopilación de datos para el análisis de forma de onda de tiempo.

Análisis de forma de onda de tiempo

El análisis de forma de onda de tiempo es una herramienta de análisis importante. Los datos de forma de onda de tiempo deben recopilarse en cada ruta, y siempre deben tenerse en cuenta al intentar diagnosticar fallas en la máquina.

El análisis de la forma de onda de tiempo es una habilidad muy importante:

Comprenderá mejor la vibración de la máquina en general y podrá diagnosticar fallas que son difíciles de diagnosticar solo con espectros. El análisis de forma de onda de tiempo es especialmente útil cuando se analizan cajas de engranajes y rodamientos.

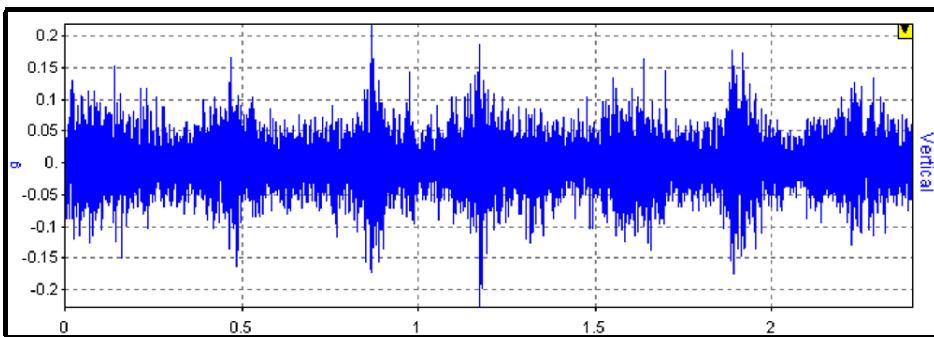


Figura 4-1

Comencemos mirando dos ejemplos. Este ejemplo es la forma de onda de tiempo de una máquina que está desbalanceada. La forma de onda de tiempo tiene un fuerte patrón “sinusoidal” correspondiente a la velocidad del eje, y por lo tanto el espectro tiene un pico fuerte correspondiente a la velocidad de funcionamiento de la máquina. La forma de onda de tiempo y el espectro están en unidades de velocidad.

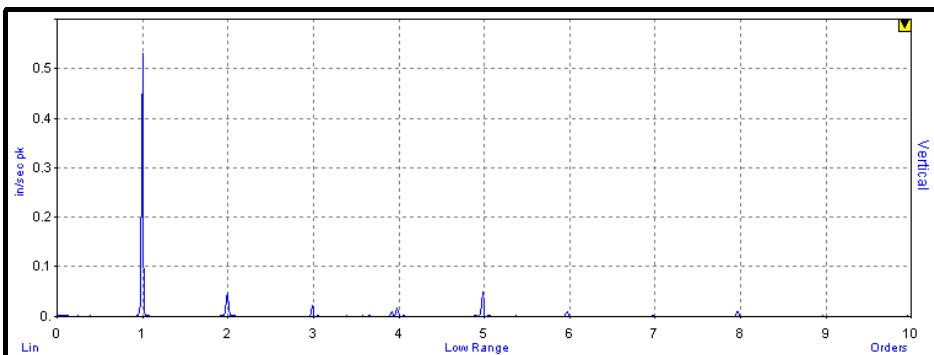


Figura 4-2

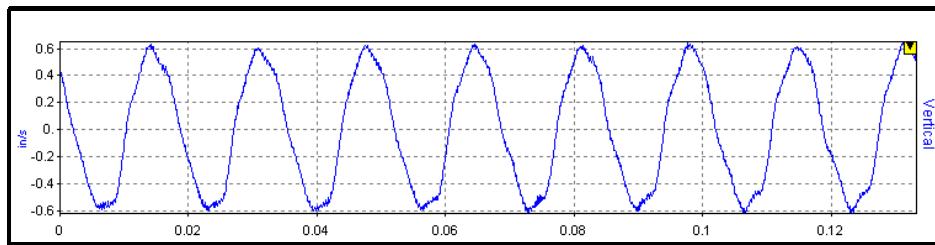


Figura 4-3

El segundo ejemplo es desde el extremo de transmisión de un motor que conduce un ventilador a través de una correa/banda. La correa está dañada, por lo que una vez por revolución (de la correa – no el eje) hay un transitorio a medida que el área dañada pasa a través de la polea/polea. Las formas de onda de tiempo en ambos casos nos dicen mucho. Pero en el segundo ejemplo, la forma de onda del tiempo nos dijo mucho más que el espectro. Esto se debe a que esperamos ver un pico en el espectro correspondiente a la velocidad de la correa, pero no esperamos ver impactos a la velocidad de la correa en la forma de onda de tiempo a menos que la correa sea defectuosa y “golpee” algo.

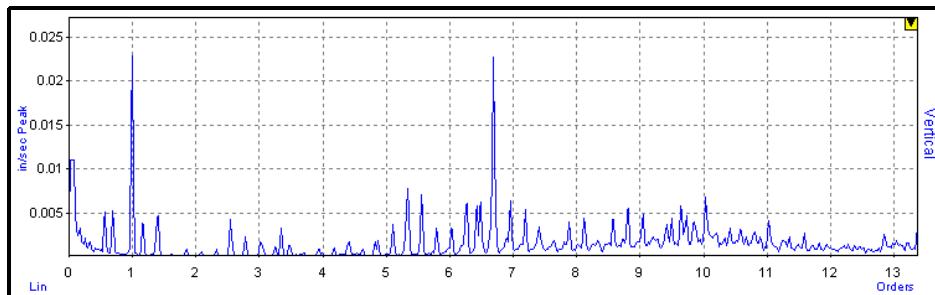


Figura 4-4

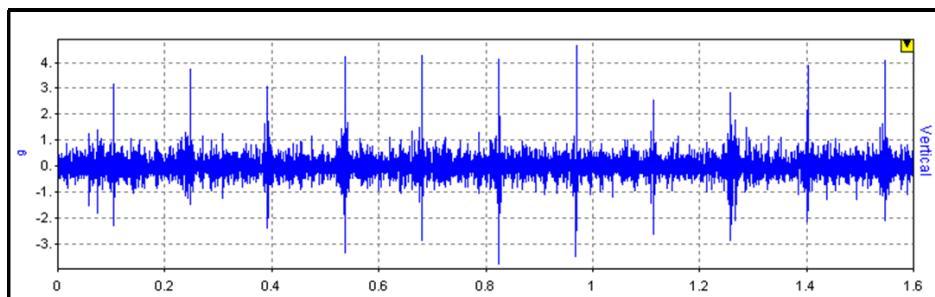


Figura 4-5

Análisis de espectro frente al análisis de forma de onda de tiempo

En los ejemplos anteriores hemos demostrado que el análisis de forma de onda de tiempo puede revelar patrones que pueden ser difíciles de interpretar solo con un espectro. Aquí hay

otro ejemplo. El espectro, en velocidad, de esta bomba de agua de refrigeración no parece tener altos niveles.

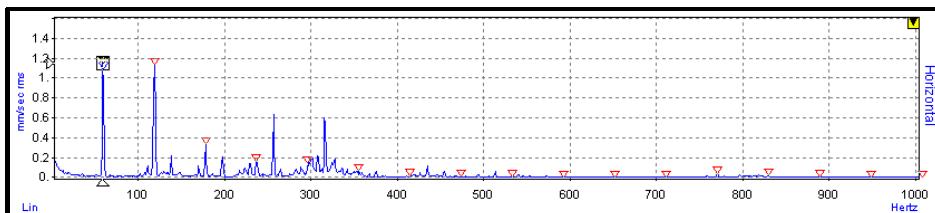


Figura 4-6

Cuando miramos la forma de onda de tiempo, vemos que hay valores G muy altos.

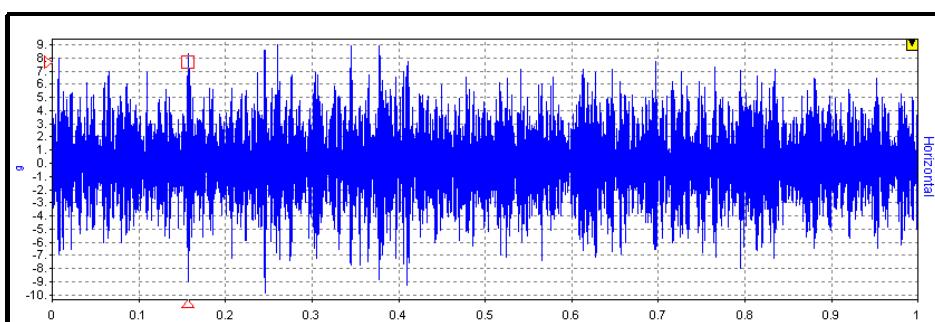


Figura 4-7

Cuando cambiamos el espectro a unidades de G podemos ver que hay una fuente de alta frecuencia, alta vibración de aceleración.

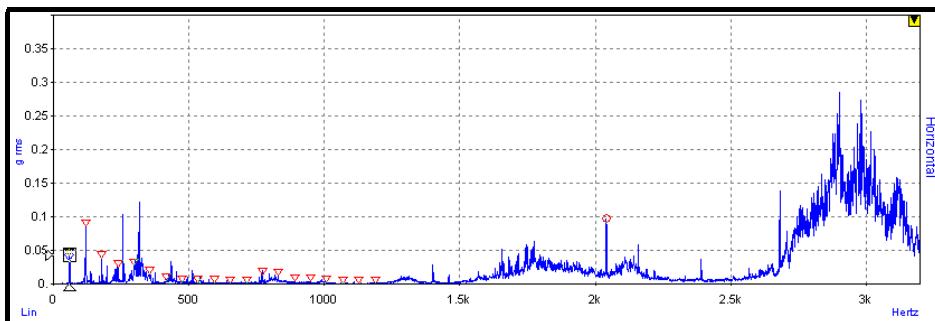


Figura 4-8

Ajustes de forma de onda de tiempo

Lo que vemos en el colector de datos o la pantalla del ordenador no es la forma de onda analógica original y pura que vino del sensor. Tenemos que digitalizarlo para que los ordenadores puedan almacenarlo y manipularlo.

Cuando nos fijamos en una forma de onda de tiempo se puede ver un número limitado de muestras (amplitudes de vibración utilizadas para crear el gráfico de forma de onda). Y dependiendo de la rapidez con la que se tomaron las lecturas, es posible que vea una fracción de segundo, o muchos segundos.

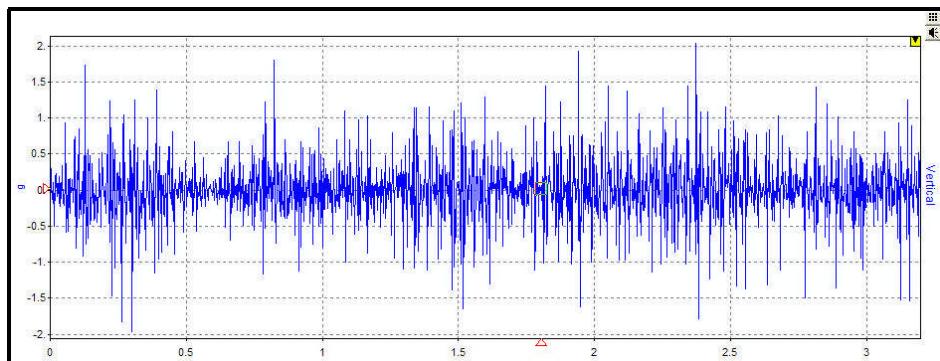


Figura 4-9

Al configurar una prueba, debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- ▢ ¿Cuánto dura la forma de onda de tiempo? ¿Qué hizo la máquina en ese tiempo?
- ▢ ¿Cuántas veces giró el eje en ese período de tiempo?
- ▢ ¿Hay suficiente resolución en el gráfico para ver impactos de corta duración?
- ▢ ¿Hay signos de batido o modulación?

Al definir una prueba, tiene tres parámetros bajo su control: la frecuencia de muestreo (el número de muestras por segundo o F_s), la longitud del registro de tiempo (T) y las unidades, por ejemplo, si integra la señal (cuando se utiliza un acelerómetro).

Si tuviéramos que muestrear la forma de onda mil millones de veces por segundo, y hacerlo durante un minuto, tendríamos una imagen muy clara de cómo la forma de onda cambió a medida que el eje giraba y las bolas rodaban alrededor de la pista, etc., pero nuestro colector de datos se quedaría sin memoria. Por el contrario, podríamos muestrear la forma de onda a sólo 20 veces por segundo, por sólo una décima de segundo. Esto ocuparía mucho menos memoria y menos tiempo, pero la resolución sería tan mala que no habría información utilizable. Obviamente, el entorno ideal está en algún lugar intermedio.

Aquí tenemos dos formas de onda de tiempo. Esta forma de onda representa 1024 muestras de tiempo con 0.3 segundos de datos. La forma de onda del tiempo no revela nada de gran interés.

Está claro que la máquina no funciona perfectamente sin problemas, pero es difícil aprender mucho más de esta forma de onda.

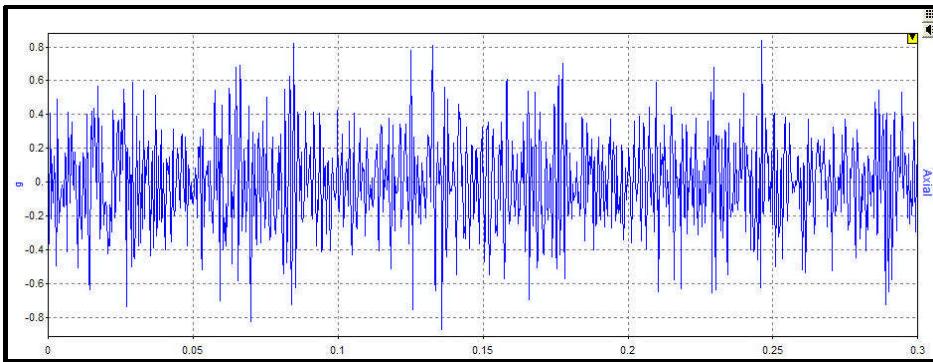


Figura 4-10

La siguiente forma de onda es de la misma máquina; sin embargo, representa más de 4.8 segundos de datos. La frecuencia de muestreo (el número de muestras por segundo) era la misma, pero esta vez colectamos 16,384 muestras. (Ajustes de espectro: F_{max} a 1333 Hz o 79,980 CPM y 6400 líneas de resolución). La segunda forma de onda nos permite ver lo que sucedió durante un período de tiempo más largo. Esta bomba estaba cavitando (ráfagas aleatorias de energía).

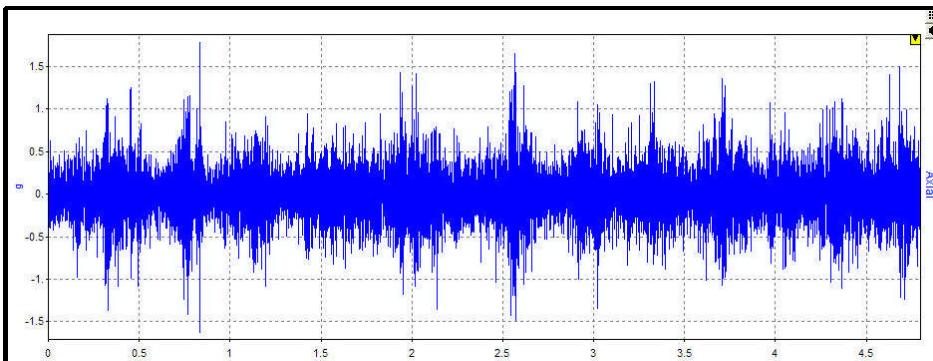


Figura 4-11

Para que usted tenga una buena sensación por los efectos de la frecuencia de muestreo y el número total de muestras colectadas, ahora vamos a ir a través de algunos ejemplos más.

En este ejemplo, hemos muestreado los datos cuatro veces más lentamente y recopilado cuatro veces menos datos que en el ejemplo anterior. Como resultado, todavía tenemos más de 4.8 segundos de datos, pero solo 4096 muestras de tiempo.

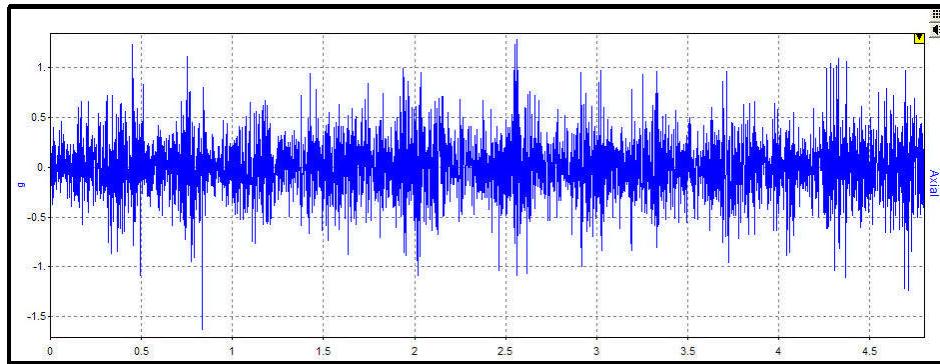


Figura 4-12

Todavía se puede ver que hay ráfagas aleatorias de energía, sin embargo, claramente hay menos resolución. (El ejemplo anterior se recopiló utilizando un F_{\max} de 333.25 Hz (19,995 CPM) y 1600 líneas de resolución).

En el siguiente ejemplo hemos vuelto a reducir la frecuencia de muestreo en un factor de cuatro y hemos recopilado una cuarta parte del número de muestras (1024 muestras). Por lo tanto, todavía tenemos más de 4.5 segundos de datos, pero cada vez es más difícil ver las ráfagas aleatorias de energía. (Estos datos se recopilaron utilizando un F_{\max} de 83.3 Hz (4999 CPM) y 400 líneas de resolución).

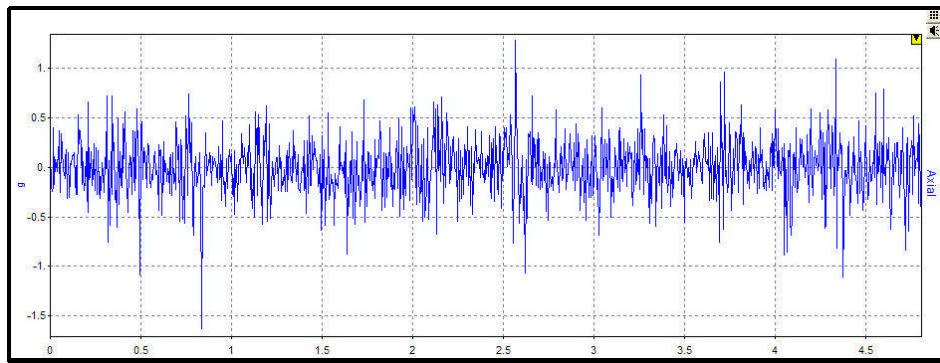


Figura 4-13

Así que usted puede ver que la calidad y la utilidad de la forma de onda se ve afectada por la frecuencia de muestreo (F_s), que se controla por el ajuste F_{\max} ($F_s = F_{\max} \times 2.56$), y el número de muestras (N) en la forma de onda, que es controlado por las líneas espectrales de ajuste de resolución ($N = LOR \times 2.56$).

Ahora veremos otro ejemplo de una forma de onda de tiempo que demuestra una condición de falla en un rodamiento.

En esta forma de onda, el F_{max} se estableció en 2000 Hz y LOR a 800 líneas, por lo tanto tenemos 2048 muestras.

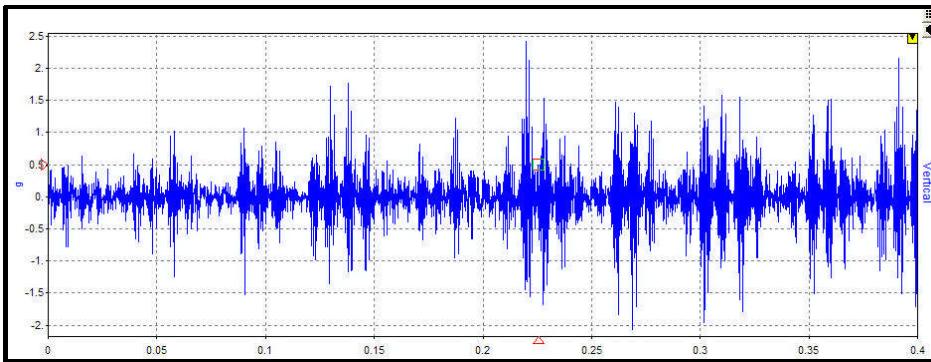


Figura 4-14

Puede ver los impactos en el rodamiento. La velocidad de la máquina era de aproximadamente 30 Hz, por lo tanto una rotación toma 0.033 segundos (1/30), por lo que esta forma de onda representa aproximadamente 10 rotaciones del eje.

Un punto interesante es que mientras que usted puede ver los impactos, usted puede también ver la modulación.

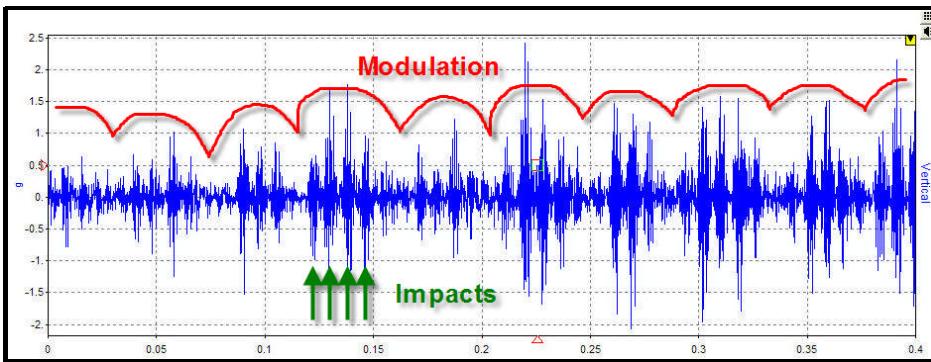


Figura 4-15

Aquí hay otra medición de la misma máquina con la misma configuración. Todavía puede ver los mismos impactos y modulación, pero obtiene una imagen bastante diferente de la severidad.

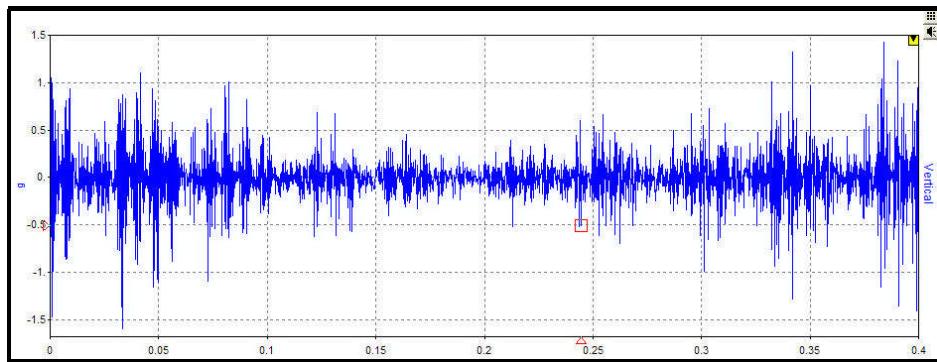


Figura 4-16

Y un ejemplo más, de nuevo tenemos la misma máquina, la misma configuración, sólo una fracción de segundo más tarde.

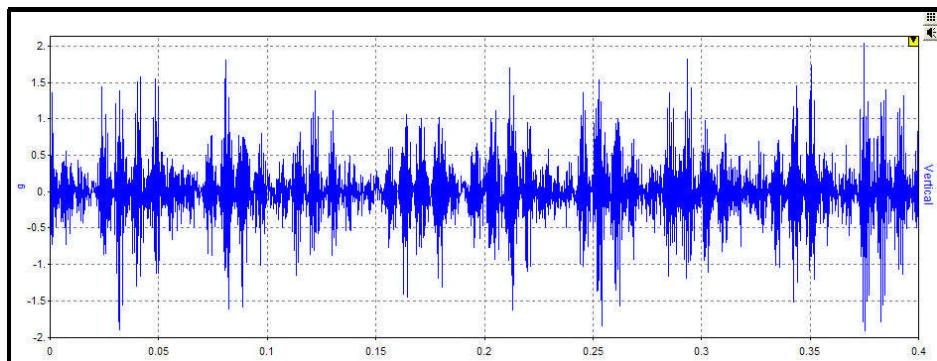


Figura 4-17

Al ver estas formas de onda usted tendría que asumir que la amplitud de vibración está subiendo y bajando 'lentamente'; podría ser modulación a medida que la jaula gira.

Ahora vamos a utilizar diferentes ajustes. El F_{\max} sigue siendo 2000 Hz, pero el LOR se ha aumentado a 1600 líneas. La longitud de la forma de onda de tiempo (T) es igual a LOR / F_{\max} . Por lo tanto, si dejamos F_{\max} igual pero aumentamos el número de líneas, obtenemos una forma de onda de tiempo más larga. Esto nos ayuda a ver eventos de menor frecuencia o cosas que tardan más en suceder.

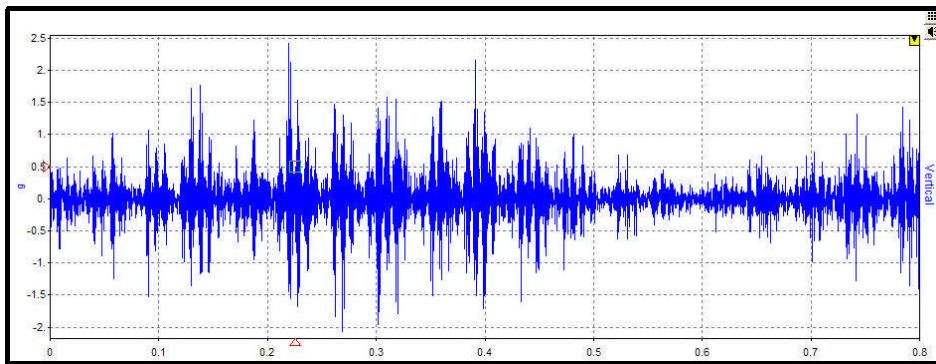


Figura 4-18

Puede ver 0.8 segundos de datos en lugar de 0.4 segundos como lo habíamos hecho anteriormente. La fuente adicional de modulación es cada vez más evidente.

En el siguiente ejemplo tenemos la misma frecuencia de muestreo (basada en $F_{\max} = 2000$ Hz) pero ahora tenemos 3200 líneas de resolución. Ahora puede ver la modulación más claramente.

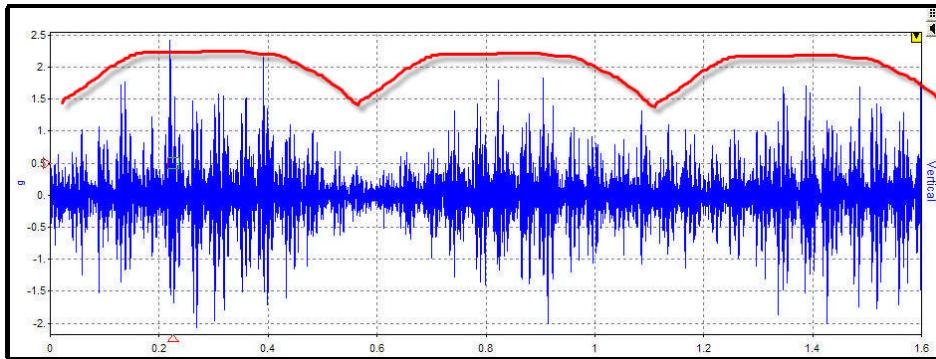


Figura 4-19

Por supuesto, cuando mantenemos la frecuencia de muestreo constante, el número de muestras por impacto o rotación del eje permanece constante. Cuando cambiamos la configuración de LOR, solo cambia el número total de muestras que recopilamos y, por lo tanto, el número de veces que el eje gira. En la mayoría de los programas de software se puede ampliar gráficamente la resolución más alta (por ejemplo, datos de 3200 líneas o 8192 muestras) para ver el mismo detalle que pudimos ver en los datos de resolución más baja (por ejemplo, 800 líneas o 2048 muestras).

Ahora vamos a cambiar la frecuencia de muestreo. En la mayoría de los analizadores, esto se logra cambiando la configuración de F_{\max} . Como referencia, repetiremos la forma de onda con 800 líneas y $F_{\max} = 2000$ Hz.

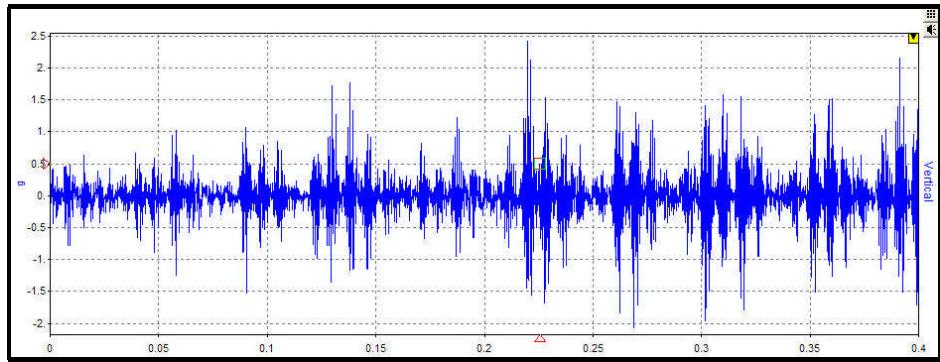


Figura 4-20

En la siguiente forma de onda de tiempo, tenemos 800 líneas (2048 muestras) y una F_{\max} de 1000 Hz (la mitad de la frecuencia de muestreo). Debido a que estamos muestreando más lentamente, pero todavía recopilando el mismo número de muestras, tenemos 0.8 segundos de datos en el registro de tiempo. ($T = \text{LOR} / F_{\max}$)

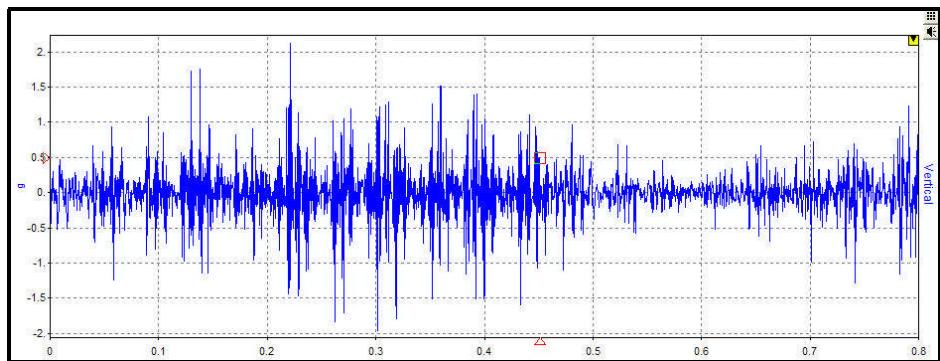


Figura 4-21

Si compara la primera de la forma de onda anterior con la línea original de 800, la medición de $F_{\max} = 2000$ Hz, puede ver el mismo impacto, pero la segunda medición no proporciona el mismo nivel de detalle.

Nota: Las medidas que está viendo no son pruebas repetidas realizadas en la máquina con diferentes configuraciones. En su lugar, se generaron “remuestreando” los datos originales, es decir, reprocesando la forma de onda para simular una frecuencia de muestreo diferente.

En el siguiente ejemplo hemos establecido el F_{\max} en 250 Hz, y de nuevo hemos utilizado 800 líneas (2048 muestras). Tenemos 3.2 segundos de datos, pero ahora es muy difícil ver los impactos o la modulación.

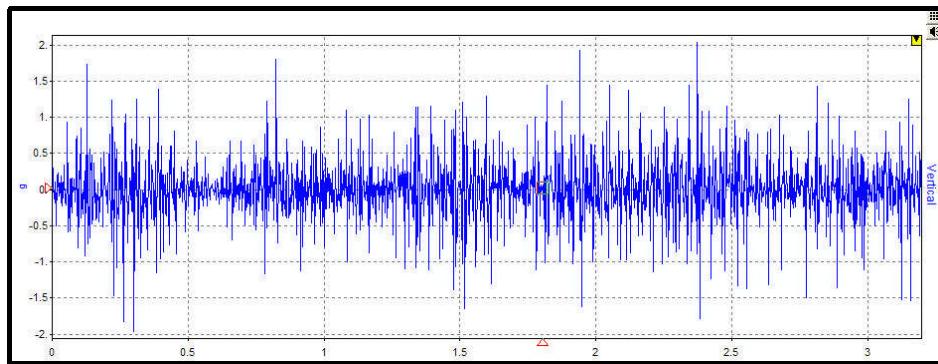


Figura 4-22

Compare la forma de onda anterior con la siguiente forma de onda que se recopiló con F_{\max} establecida en 2000 Hz (es decir, los datos originales) y 6400 líneas de resolución (es decir, 16384 muestras de datos en el registro).

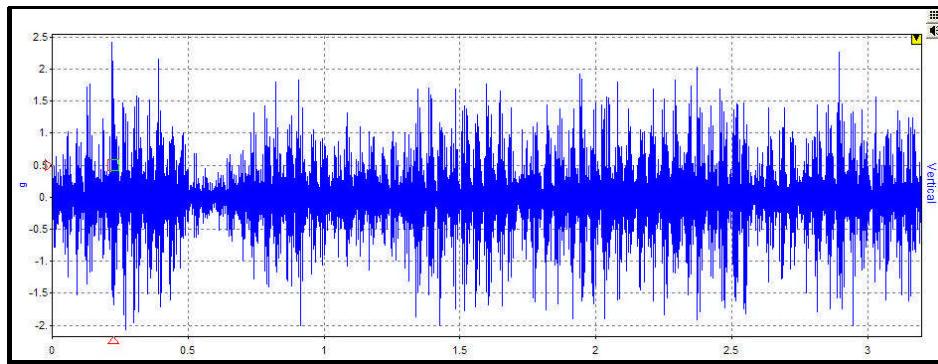


Figura 4-23

Hay mucho más detalle, y ahora podemos hacer zoom gráficamente en cualquier parte de la forma de onda para comprender mejor los impactos y la modulación.

Configuración de medición

Hay dos configuraciones clave que dictan el formato de la forma de onda de tiempo, son la frecuencia de muestreo (F_s) y el número de muestras (N). El objetivo es configurar estos ajustes de tal manera que se optimicen los dos atributos siguientes de la forma de onda de tiempo que la hacen aceptable para el análisis.

Estos son: La longitud de la forma de onda de tiempo (T) y la resolución de la forma de onda de tiempo o el tiempo entre muestras (T_s)

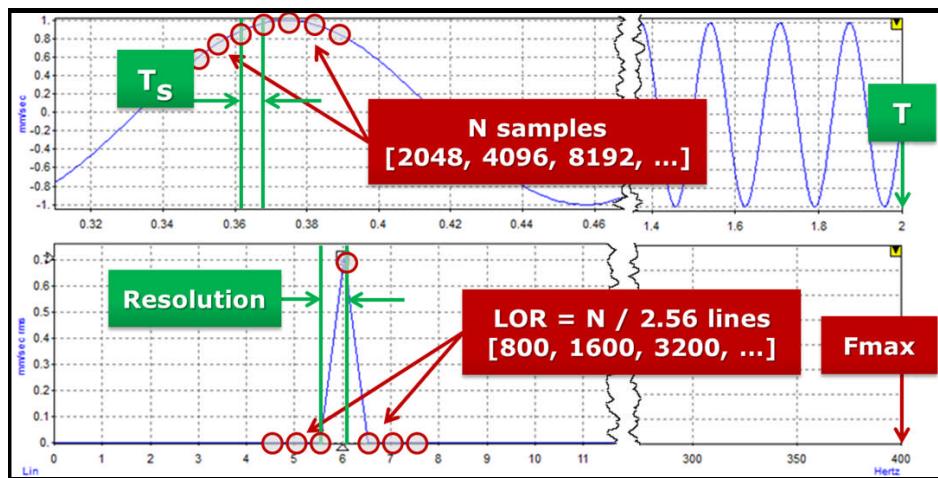


Figura 4-24 Atributos de la forma de onda de tiempo

En cuanto a la **longitud de tiempo de forma de onda** (T), si es **demasiado corto** es posible que no vea cosas que tardan más en suceder, como el eje girando unas cuantas veces o el mismo diente dañado engranando varias veces o patrones como la modulación y el batido.

Si (T) es **demasiado tiempo** puede haber demasiada información y, por lo tanto, no hay suficiente detalle para ver impactos individuales o eventos de duración más corta. Es como si “no pueda ver el bosque por los árboles”.

En general, una buena opción para el monitoreo general de maquinaria es ver 4-6 (máx. 10) revoluciones del eje.

En cuanto al **tiempo entre muestras (T_s)** – esta es la cantidad de detalles que tiene para cada evento. Si hay demasiado tiempo entre las muestras se perderá cosas que suceden muy rápido. No es un problema tener menos tiempo entre muestras o un T_s más pequeño aparte de que hay más datos en un tiempo especificado T para transmitir y almacenar.

Como pauta general, es mejor tener 10 muestras por evento de interés, como un engranaje o un impacto de un rodillo en un rodamiento.

Aquí hay algunas otras relaciones entre las variables que describen la forma de onda de tiempo y el espectro.

Longitud del registro (T) = tiempo entre muestras (T_s) x número de muestras (N)

Algunos recopiladores de datos (y el software que lo acompaña) le permiten establecer la frecuencia de muestreo y el número de muestras directamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos debe elegir entre las opciones normalmente asociadas con el espectro: LOR (líneas de resolución) y F_{max} .

El F_{max} controla la frecuencia de muestreo:

$$\text{Frecuencia de muestreo } (F_s) = 2.56 \times F_{max}$$

Y el número de muestras en la forma de onda de tiempo está determinado por la configuración de líneas de resolución:

$$\text{Número de muestras } (N) = 2.56 \times \text{Líneas de resolución}$$

El número de muestras es siempre una “potencia de dos”: 2048, 4096, 8192, etc.

- 400 líneas -> 1024 muestras
- 800 líneas -> 2048 muestras
- 1600 líneas -> 4096 muestras
- 3200 líneas -> 8192 muestras

La longitud de la forma de onda de tiempo (T) (número de segundos en la ventana de tiempo) es por lo tanto una relación de estos valores:

$$T = \text{Líneas de resolución} / F_{max}$$

- T Measurement time
- T_s Time between samples
- N Record length (e.g. 1024, 2048, 4096, etc.)
- $lines$ Lines of resolution (e.g. 400, 800, 1600, etc.)
- F_{max} Maximum frequency in the spectrum

$$T = T_s \times N = \frac{N}{F_s} = \frac{N}{2.56 \times F_{max}} = \frac{lines}{F_{max}}$$

Figura 4-25 La Fórmula

Todas las relaciones que hemos estado discutiendo se pueden resumir en la fórmula anterior

Calculando la configuración correcta

Vamos a usar un ejemplo de una máquina de 1800 RPM (1800 RPM a 30 Hz) y calcular qué ajustes de F_{max} y LOR necesitaríamos para ver aproximadamente 6 rotaciones del eje en la forma de onda de tiempo.

Una rotación del eje (el período del eje) es de $1 / 30$ Hz o 0.034 segundos. Recuerde que el período (P) – el tiempo en segundos para completar un ciclo es igual a $1 /$ la frecuencia en Hz. ($P = 1 / F_{Hz}$) por lo que $P = 1 / 30$ o 0.034 segundos.

Si queremos 6 rotaciones en la forma de onda de tiempo, entonces la longitud de la forma de onda de tiempo T tendrá que ser igual a $(6 \times 0.034) = 0.2$ segundos.

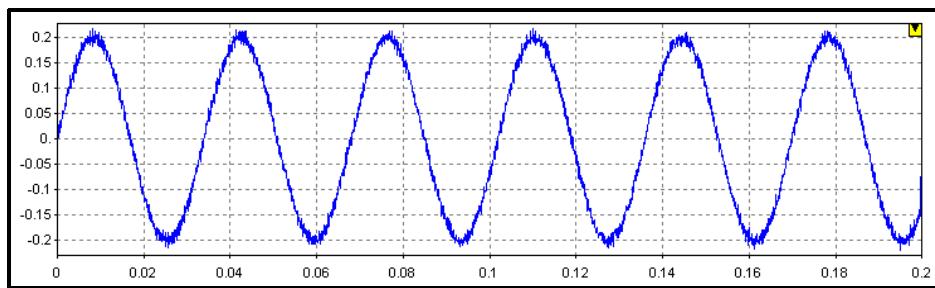


Figura 4-26

Si seleccionamos 4096 muestras en la forma de onda (recomendado) que corresponde a un espectro de 1600 líneas, necesitamos muestrear la máquina en $(4096/0.2)$ 20,480 muestras por segundo.

Esa frecuencia de muestreo corresponde a un ajuste F_{max} de $(20480/2.56)$ 8,000 Hz. Por lo tanto, para recopilar la forma de onda de tiempo deseada, estableceríamos LOR en 1600 líneas, y la F_{max} a 8 kHz. Recuerde que $T = LOR / F_{max}$ por lo que $1600 / 8000 = 0.2$ segundos, que es lo que queríamos medir para ver 6 rotaciones del eje.

Hay una herramienta en nuestro sitio web que puede ayudarle a realizar este cálculo en el futuro:

<https://www.mobiusinstitute.com/site2/detail.asp?LinkID=54>

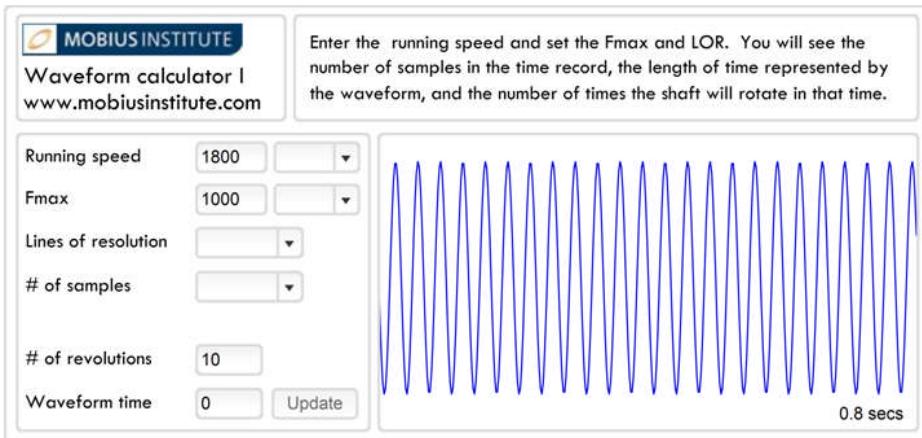


Figura 4-27

Unidades de vibración

El otro tema que tenemos que considerar es si mirar la forma de onda de tiempo en unidades de aceleración, velocidad o desplazamiento. Se podría decir mucho sobre este tema, pero en la mayoría de los casos se debe utilizar la aceleración (por ejemplo, G). La forma de onda de aceleración resaltaría (retendrá) la información importante que afecta a alta frecuencia. Si la señal está “integrada” a la velocidad, la información de frecuencia más alta se reduce o se pierde, y la doble integración al desplazamiento eliminará la información de alta frecuencia restante. (Las reglas son diferentes para las máquinas de rodamientos de deslizamiento – el desplazamiento es la unidad de elección).

Estas dos señales provienen de la misma posición y eje de la misma máquina. Usted puede ver fácilmente que la información de alta frecuencia es mucho más obvia en la forma de onda de aceleración (y el espectro).

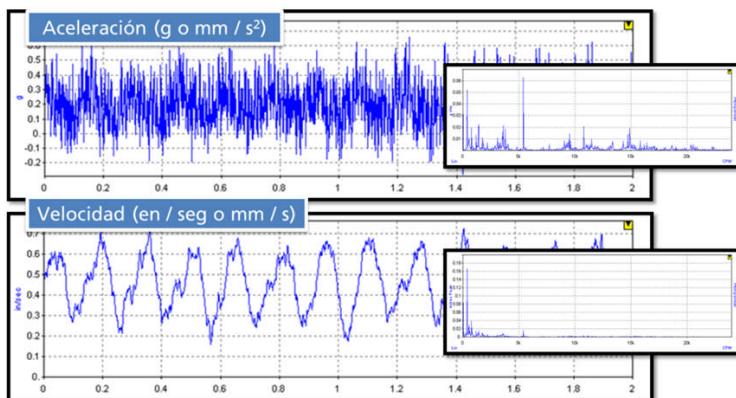


Figura 4-28

Puntos clave

- EI** En CAT II aprendió a configurar los ajustes del recopilador de datos para optimizar el espectro para el análisis. En este curso, los alumnos deben entender cómo configurar los ajustes para optimizar la forma de onda de tiempo para el análisis.
- EI** Los estudiantes deben entender los atributos clave de la forma de onda del tiempo
 - o Longitud del registro de tiempo (T)
 - o Tiempo entre muestras o período de muestra (T_s)
- EI** Los estudiantes deben ser capaces de configurar pruebas para capturar frecuencias de engrane, un cierto número de revoluciones de eje u otros eventos clave.
- EI** Los estudiantes deben entender la relación entre la forma de onda de tiempo y el espectro y entre la forma de onda de tiempo y la configuración del analizador.
 - o La fórmula en la Figura 4-25 se proveerá en el examen
- EI** Los estudiantes deben entender la importancia de elegir las unidades de medida correctas (A, V, D)

Técnicas de análisis de forma de onda de tiempo

Al analizar formas de onda de tiempo hay algunos términos con los que debe estar familiarizado: el pico, RMS, pico a pico, período y frecuencia. Todos estos se describen en esta diapositiva, y en la sección de fundamentos de vibración. El problema clave es que si mide el tiempo entre dos “eventos” en una forma de onda de tiempo y, a continuación, calcula la inversa (recíproca), calculará la frecuencia ($P = 1/F$ Hz y F Hz = $1/P$ segundos). Con esa información se puede buscar en el espectro para el pico correspondiente, y lo que es más importante, se puede comparar con lo que sabe acerca de la máquina: velocidad, frecuencias forzadas de rodamientos, velocidad de correa, etc.

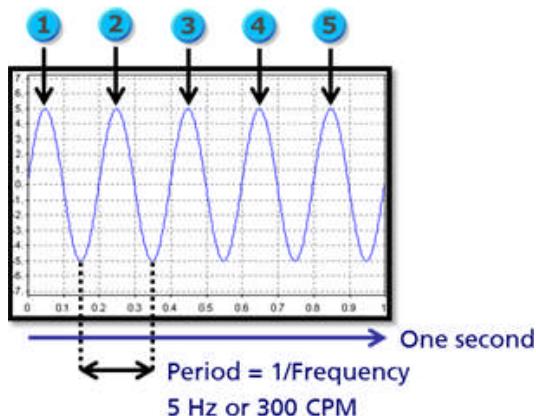


Figura 4-29

Tomemos un ejemplo simple primero. Aquí podemos ver claramente una fuerte señal sinusoidal.

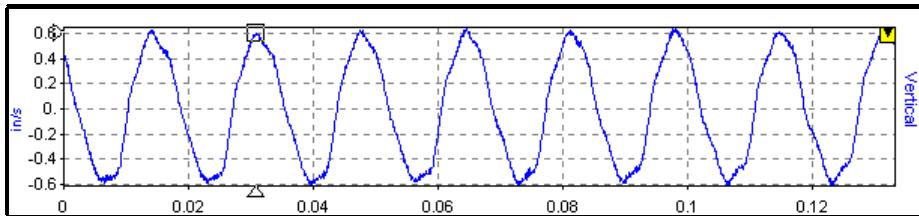


Figura 4-30

Si colocamos el cursor en la forma de onda de tiempo obtendremos un tiempo relativo al comienzo del registro. Realmente no nos importa cuál es ese tiempo, sin embargo, nos permite medir la diferencia de tiempo entre dos eventos.

Tomemos el tiempo en la parte superior de dos ciclos. Podemos ver que las muestras están en 0.0141 segundos y 0.0308 muestras. El delta es 0.0167 segundos. Sabemos que la frecuencia es la inversa del período, por lo que la frecuencia debe ser $1/0.0167$ o 59.88 Hz o 3593 CPM.

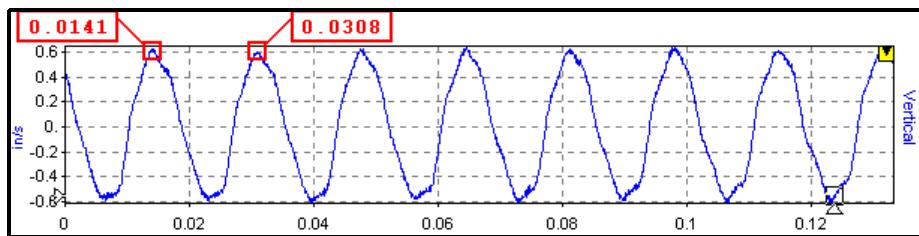


Figura 4-31

La máquina en cuestión gira a 3593 CPM. Si ahora miramos el espectro, podemos ver que hay un pico claro en esta frecuencia, tal como esperaríamos.

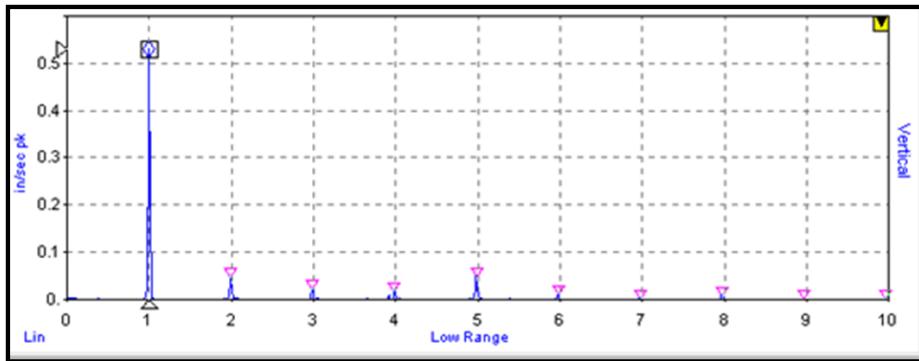


Figura 4-32

Echemos un vistazo a una forma de onda un poco más complicada. Si revisamos una muestra que vimos hace un momento, podemos ver que hay pulsos en la forma de onda del tiempo. Si

nos fijamos en el tiempo de dos pulsos, y luego calcular la diferencia, por lo tanto, tenemos el tiempo entre los dos eventos.

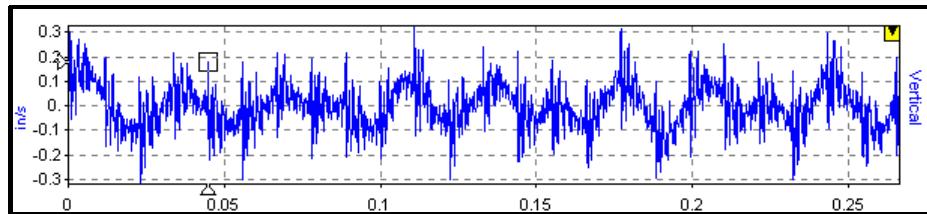


Figura 4-33

En este caso la diferencia es 0.0109 segundos. Esto sugeriría que el período de esta señal es 0.0109 segundos. Por lo tanto, la frecuencia es $1/0.0109$ o 91.74 Hz (5504 CPM). La velocidad de funcionamiento de esta máquina es de 1776 CPM, por lo que esta señal es 3.099X la velocidad de funcionamiento.

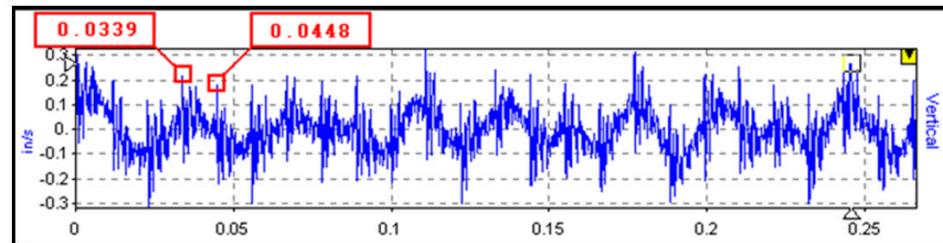


Figura 4-34

En el espectro también encontramos un pico a esta frecuencia. En este caso tuvimos verificación – hubo un pico en el espectro en la misma frecuencia. Este no siempre es el caso, y es por eso que este método es tan poderoso.

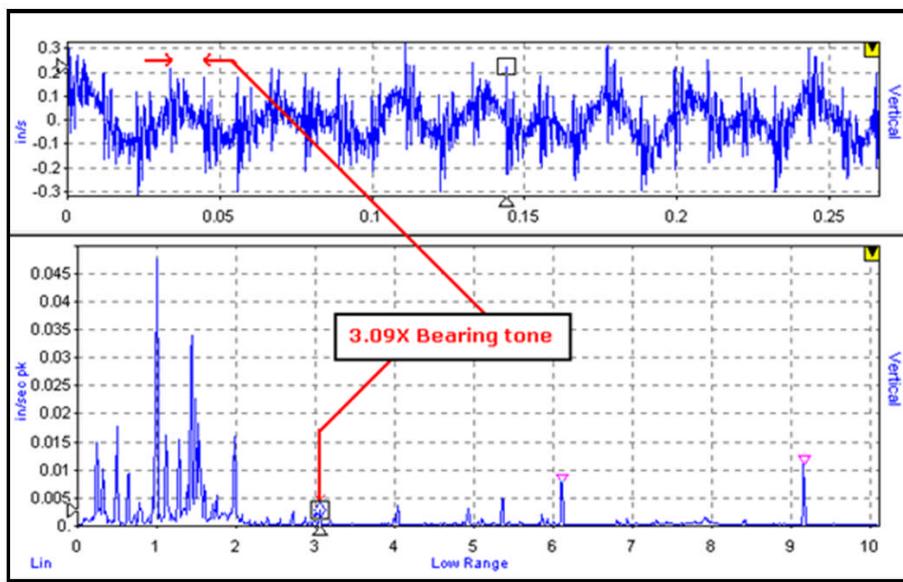


Figura 4-35

En este ejemplo, podemos ver que el tiempo entre los pulsos es 0.1441 segundos, que se relaciona con 6.94 Hz, o 416 CPM. La velocidad de funcionamiento de la máquina fue de 1792 CPM, por lo que esta frecuencia es de aproximadamente 0.23 x.

La distancia entre el eje principal y la polea de entrada del engranaje era de 6" (152 mm). El diámetro de la polea del motor era de 134" (34 mm), y el diámetro de la polea de la caja de engranajes era de 2.64" (67 mm). Si usamos una fórmula para calcular la velocidad lineal de la correa (conocida como la velocidad de la correa) vemos que la velocidad de la correa es 0.23 veces la velocidad de funcionamiento.

Por lo tanto, sabemos con seguridad que los impactos están relacionados con la correa/banda

$$\text{Belt rate} = \frac{2 \times \text{Driver } \phi}{\text{Driver } \phi + \text{Driven } \phi + \frac{4}{\pi} \times \sqrt{\left[\left(\frac{\text{Driven } \phi - \text{Driver } \phi}{2} \right)^2 + \text{Distance b/n Center } s^2 \right]}}$$

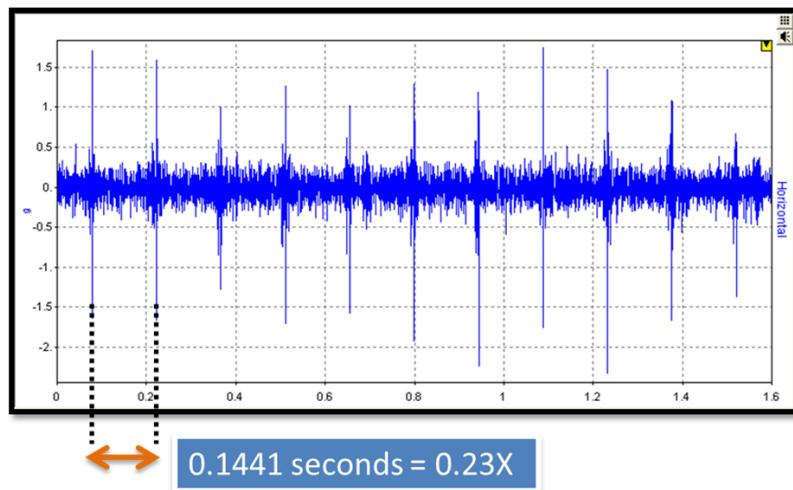


Figura 4-36

Reconociendo patrones de vibración

Con el fin de realizar el análisis de forma de onda de tiempo es MUY útil si usted entiende la relación entre el fenómeno mecánico, las señales, la forma de onda de tiempo, y el espectro. Esperemos que cuando vea patrones sinusoidales, transitorios y pulsos en la forma de onda (y vea armónicos, bandas laterales o un piso de ruido elevado en el espectro), sabrá por qué y cómo llegaron allí, y puede relacionarlo con lo que está sucediendo dentro de la máquina.

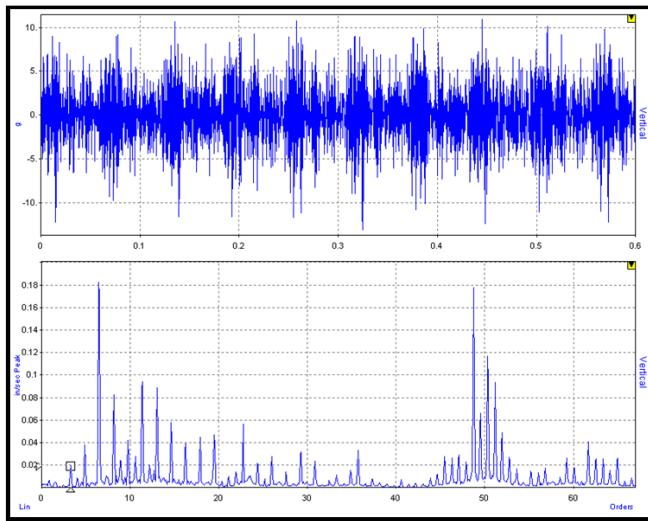


Figura 4-37

Fallas de rodamientos y modulación de amplitud

¿Por qué estamos discutiendo la modulación? Bueno, a menudo lo vemos cuando se diagnostican condiciones comunes de fallas, especialmente rodamientos de elementos rodantes y cajas de engranajes.

Imagíñese una pelota rodando dentro de un rodamiento - una bola con algún daño. Ahora, a medida que gira alrededor, el área dañada afecta la pista interna y externa, lo que genera vibración. La frecuencia de la vibración se puede calcular, ya que depende del tamaño de la bola y el diámetro de la pista interna y externa. Pero la amplitud de los impactos no es constante, y por lo tanto la vibración no es constante. Verá, a medida que la bola rueda en la zona de carga del rodamiento, las fuerzas son mayores, alcanzando su mayor nivel cuando está en el centro de la zona de carga. Pero a medida que sale de la zona de carga, la fuerza de los impactos se reduce, alcanzando su nivel mínimo cuando la pelota está en la parte superior de la pista interna (fuera de la zona de carga).

El resultado es que la amplitud de la vibración aumenta y baja periódicamente. La frecuencia "portadora" es la frecuencia de giro de la bola, y se modula por la frecuencia de la jaula (la velocidad a la que la bola se mueve alrededor del rodamiento). El espectro tendría un pico en la frecuencia de "giro de bola", y habría bandas laterales "fundamentales de jaula" o "FT".

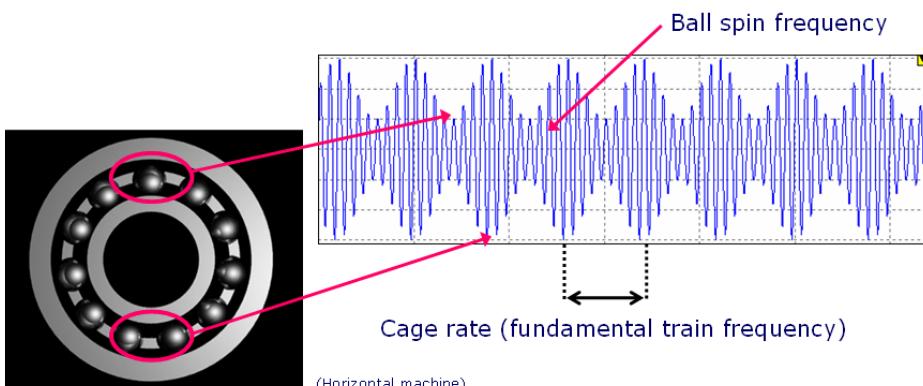


Figura 4-38

Del mismo modo, si hubo un defecto en la pista interna del eje, ya que ese defecto entra en contacto con bolas/rodillos en la zona de carga la vibración es mayor que cuando impacta fuera de la zona de carga. Esta vez el portador es la frecuencia "paso de bola por la pista interna" o "BPI", y la frecuencia de modulación es la velocidad de operación (a medida que la pista interna gira una vez por revolución del eje). El espectro tendría un pico en la frecuencia de "paso de bola por pista interna", y habría bandas laterales de "velocidad de operación" o "IX".

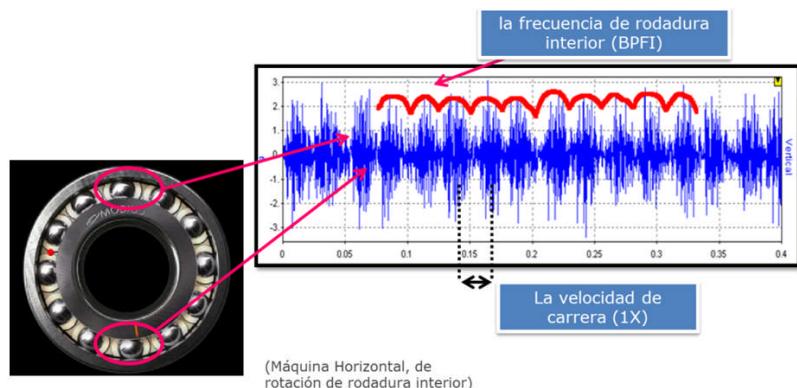


Figura 4-39

Aquí hay otro caso clásico de modulación de amplitud. Los dos engranajes se están entrelazando, pero están ligeramente desalineados.

Puede ver dos patrones de modulación, uno para el eje/engranaje de giro más grande y lento, y otro patrón de amplitud más bajo para el engranaje de piñón de tomeado más pequeño y más rápido. El espectro también tenía bandas laterales 1X alrededor del pico de engranaje. El espaciado entre las bandas laterales corresponde a la velocidad del eje de salida más lento.

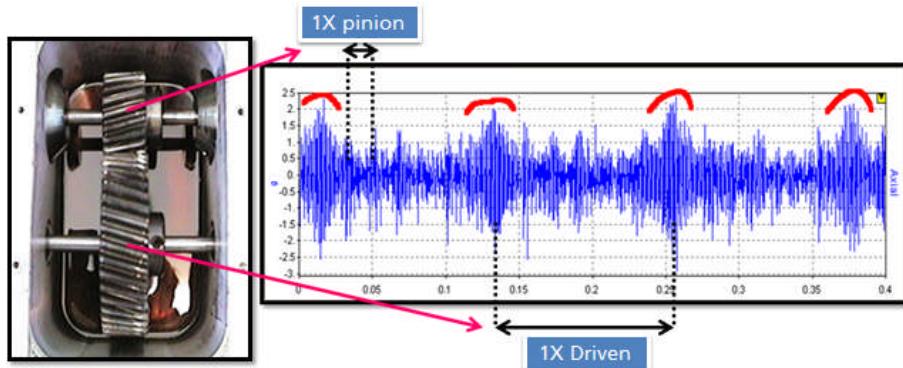


Figura 4-40

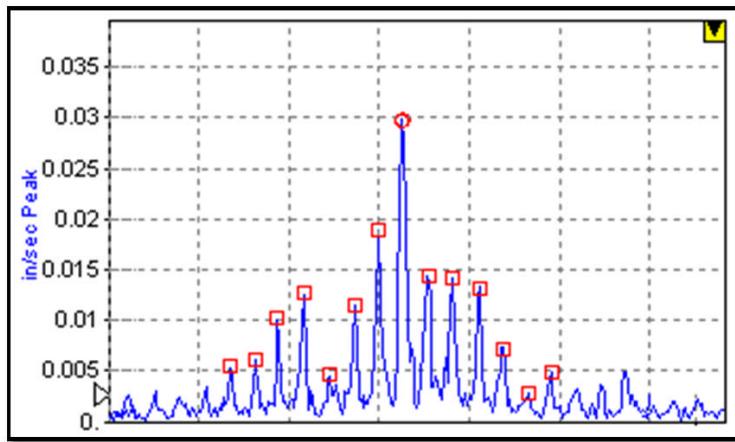


Figura 4-41

Vibración recortada “no lineal”

Otro fenómeno muy común es la vibración “no lineal”, o formas de onda truncadas. Si el movimiento en una dirección estaba restringido, entonces en lugar de una señal sinusoidal clásica, en su lugar se encuentra que la forma de onda está recortada. En este ejemplo tenemos dos señales de 100 Hz, una recortada y otra normal. La onda sinusoidal normal, por supuesto, tiene un solo pico en el espectro, pero la forma de onda recortada tiene armónicos – picos a 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, y así sucesivamente.

En casos más graves, los armónicos aparecerán en 1/2 la frecuencia, o 1/3 la frecuencia. Veremos algunos ejemplos en breve.

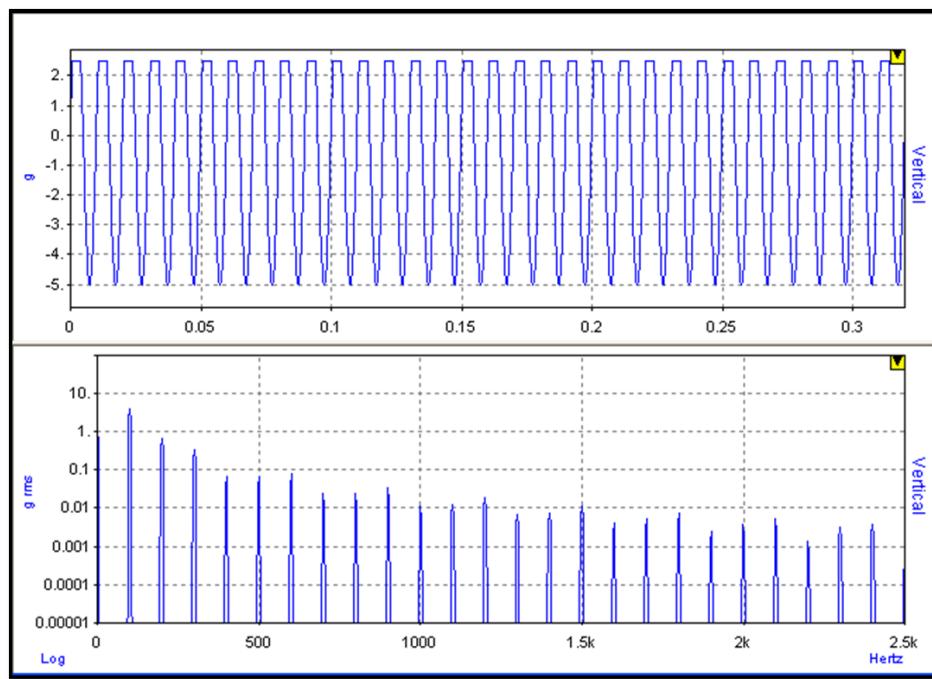


Figura 4-42

Impactos

Y otro fenómeno común en el estudio de la vibración de las máquinas es el impacto. Los impactos pueden ocurrir cuando los defectos en los rodillos golpean la pista interna y externa de un rodamiento; impactos ocurren a como las partes sueltas traqueean; y hay muchos otros ejemplos. Si tuviéramos que golpear una máquina y mirar la forma de onda veríamos un pulso o transitorio, y el espectro tendría energía en todas las frecuencias. El espectro no tiene picos, porque no hay patrones repetidos en la forma de onda, pero el piso de ruido se ha elevado. Por lo tanto, si se produce un impacto, esperaríamos que suba el piso de ruido del espectro.

En este ejemplo, en realidad hubo un pico eléctrico en la forma de onda. También se puede ver el piso de ruido elevado, y la clásica curva descendiente al inicio del espectro (ski-slope). Si usted ve esta curva, siempre puede asumir que hubo un impacto severo o algún otro tipo de transitorio, y debe repetir la prueba y buscar el motivo de la curva (hay algunas posibilidades).

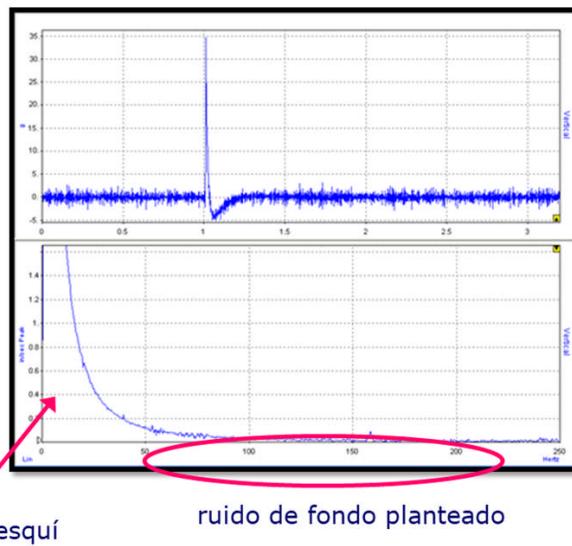


Figura 4-43

Holgura rotativa

Si los impactos son repetitivos, por ejemplo, el impacto se produce una vez por revolución (como en el caso de la holgura giratoria), no sólo vemos el piso de ruido elevado, vemos otras dos características. En primer lugar, debido a que el impacto es repetitivo, vemos un pico en el espectro a la tasa de repetición. Si hubo un impacto por revolución, habrá un pico a 1X (velocidad de funcionamiento) en el espectro. En segundo lugar, debido a que el impacto es “no lineal”, vemos armónicos en el espectro (como se discute en “entendiendo las señales”).

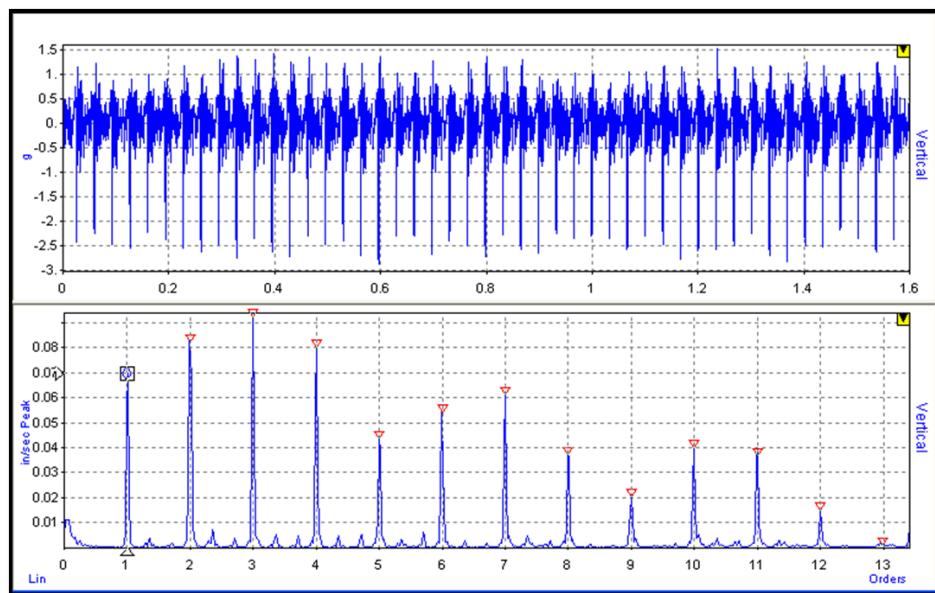


Figura 4-44

Supongamos que un rodamiento de pedestal está suelto, y a medida que el eje gira está sacudiendo hacia arriba y hacia abajo. Si los pernos de retención estuvieran muy sueltos, y no hubiera impactos, no habría armónicos, sólo un pico 1X alto (en la dirección horizontal) mientras se mueve de un lado a otro. Pero tenemos impactos severos, así que tenemos muchos armónicos. Se pueden ver claramente los impactos, y se pueden ver los armónicos en el espectro (de hecho, se puede ver que en realidad hay 1/3 armónicos, un signo seguro de soltura severa).

Hay algo interesante en estos datos. ¿Observa que los picos negativos (0.6-1G) son mayores que los picos de marcha positivos (0.2-0.4 G)? Eso significa que el rodamiento tenía una libertad ligeramente mayor en una dirección que la otra, lo que es consistente con el diagnóstico de holgura.

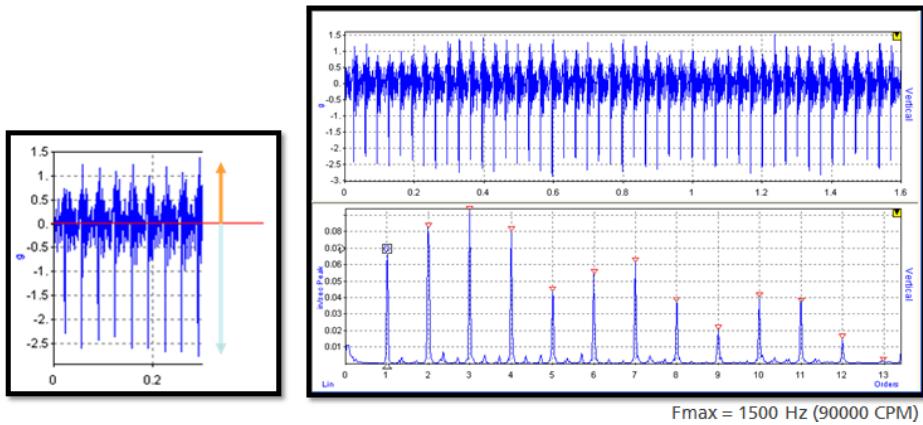


Figura 4-45

Cavitación

Este es un ejemplo interesante: cavitación en una bomba. Si sólo pudiera escuchar estos datos usted sería capaz de escuchar un sonido de molienda. Si mira de cerca a las pulsaciones en la forma de onda verá que no están espaciadas uniformemente. La fuente de la vibración no es periódica. Verá en el espectro que el piso de ruido se ha elevado, especialmente en las frecuencias más altas.

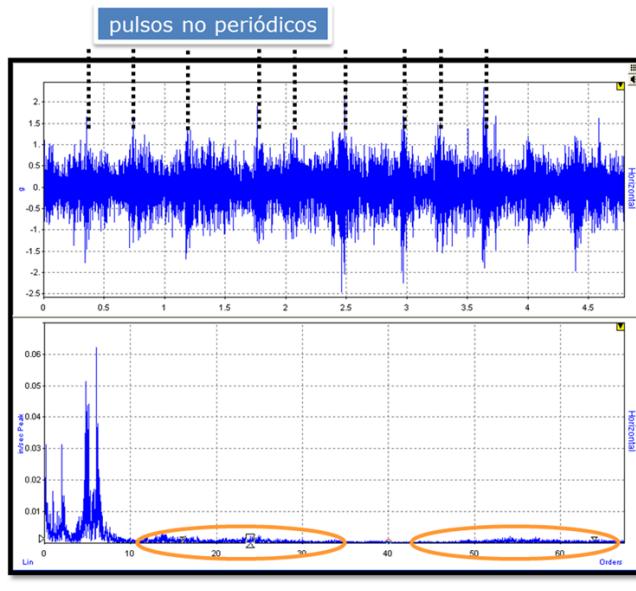


Figura 4-46

Direcciones de medición y almacenamiento

Recuerde que las máquinas vibran en tres direcciones. Al realizar un análisis normal del espectro siempre es importante tener una lectura axial, vertical y horizontal. Lo mismo es cierto con sus lecturas de forma de onda de tiempo. Debido a que algunas fallas solo aparecen en ciertos ejes, o se pueden entender mejor comparando el nivel o patrón entre ejes (o entre diferentes puntos de una máquina), debe realizar las mismas comparaciones con los datos de forma de onda. No requiere ningún tiempo de recopilación adicional y debe tener suficiente capacidad de memoria en el recopilador de datos.

Si no puede medir en los tres ejes, debe decidir qué eje proporcionará los mejores datos. Piense cuidadosamente en el tipo de falla que está buscando, y considere en qué dirección se dan las fuerzas clave.

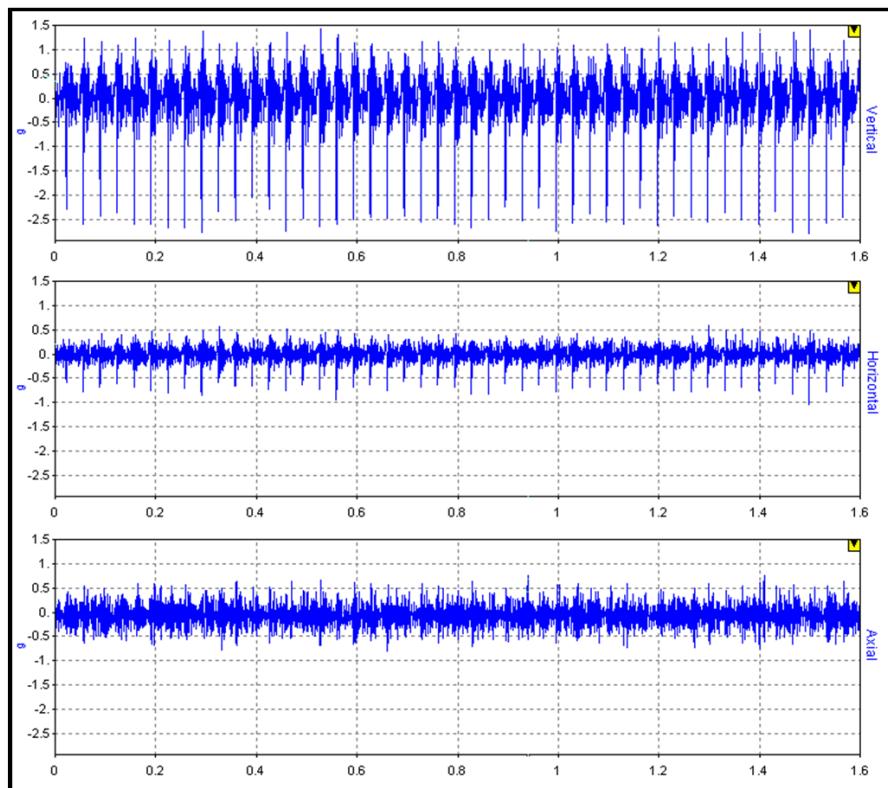


Figura 4-47

Análisis de fallos en cajas de engranajes

Si usted tiene una caja de engranajes, entonces usted debe adquirir y analizar formas de onda de tiempo - es tan simple como eso. Si bien hay patrones espectrales que puede buscar, no hay duda de que la forma de onda de tiempo revela la información más clara.

Discutimos los detalles en la sección de análisis de la caja de engranajes, pero en general hay dos tipos de falla en engranajes:

Si hay desalineación o un eje doblado, por ejemplo, la vibración será relativamente constante a medida que cada eje gire (aunque las fuerzas cambiarán periódicamente) – por lo tanto, la información en el espectro representará mejor la condición de falla. La frecuencia de engrane (y o $2xGM$ y $3xGM$) cambiará de amplitud y las bandas laterales alrededor de los picos de engrane cambiarán de amplitud.

Si hay daño en uno o más dientes, entonces la vibración será diferente cuando ese diente está engranando. El cambio de vibración será momentáneo. Si un diente está dañado (agrietado, roto o desgastado), entonces la vibración cambiará una vez por revolución. El espectro cambiará, pero cambiará de maneras menos predecibles. La forma de onda de tiempo, si se colecta correctamente, revelará la naturaleza exacta de la condición de falla. Usted puede ser capaz de decir cuántos dientes están dañados, y el uso de técnicas como el promediado síncrono de tiempo, usted será capaz de realizar este análisis incluso en cajas de engranajes complejas.

El siguiente espectro proviene de una caja de engranajes. No indica que exista una condición de falla.

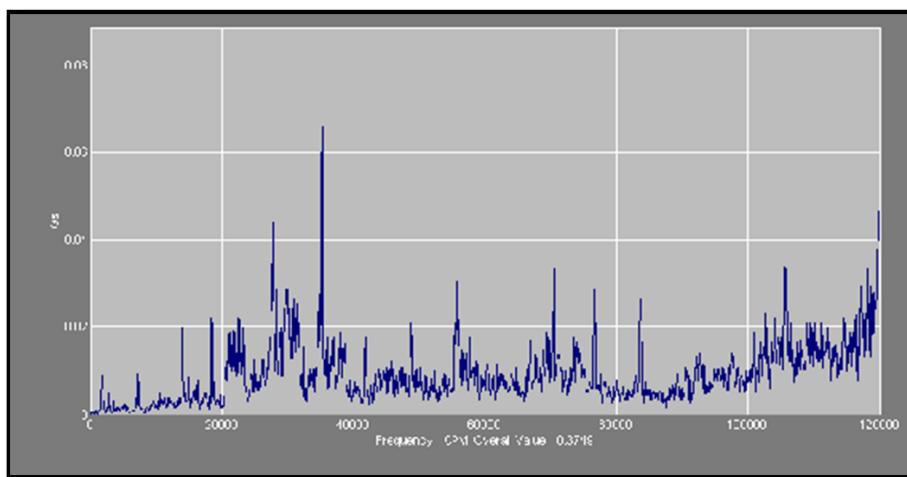


Figura 4-48

Cuando se mira la forma de onda de tiempo, está claro que existe una falla.

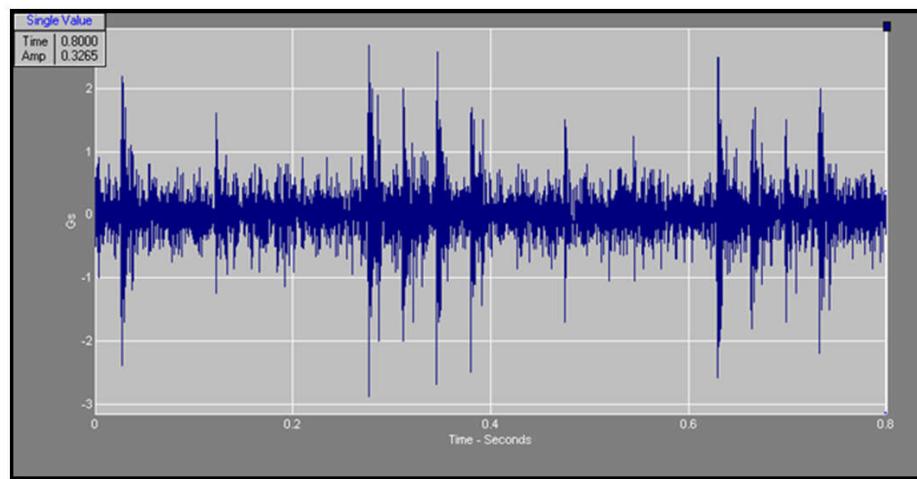


Figura 4-49

La forma de onda de tiempo indica claramente que existe una falla, e incluso que el daño se limita a un área. Aunque el gráfico es muy pobre, la forma de onda verde fue tomada de la máquina cuando fue reparada, y la forma de onda azul se recolectó cuando la caja de engranajes fue dañada.

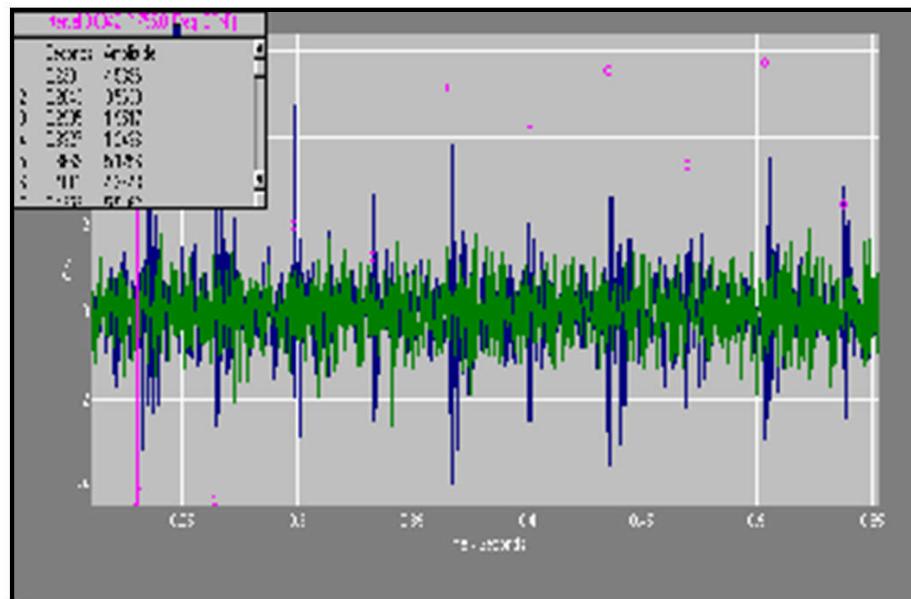


Figura 4-50

Aquí tenemos otro ejemplo donde el espectro no indica que exista un problema, mientras que la forma de onda de tiempo indica claramente que uno de los engranajes está dañado en un área.

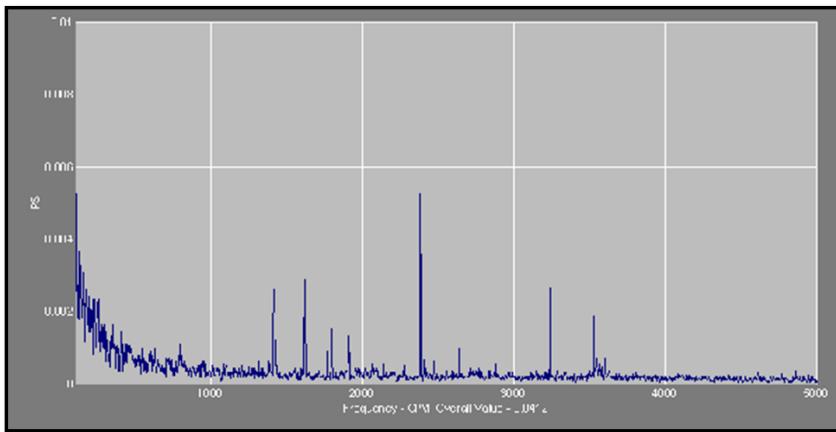


Figura 4-51

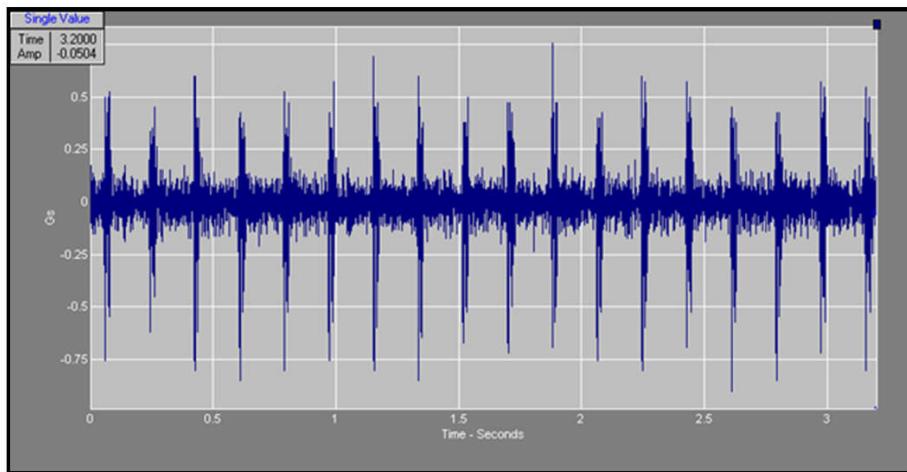


Figura 4-52

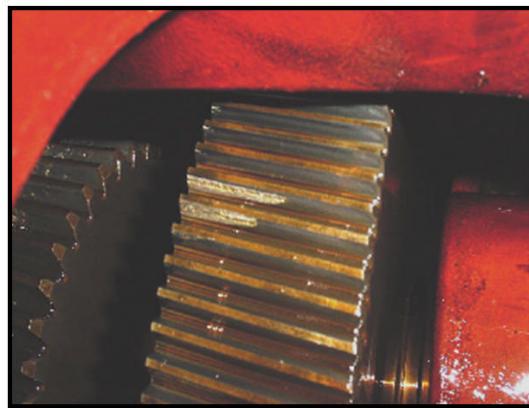


Figura 4-53

Y aquí hay un ejemplo más. La forma de onda indica claramente que existe una falla, sin embargo, el espectro no proporciona el mismo nivel de información.

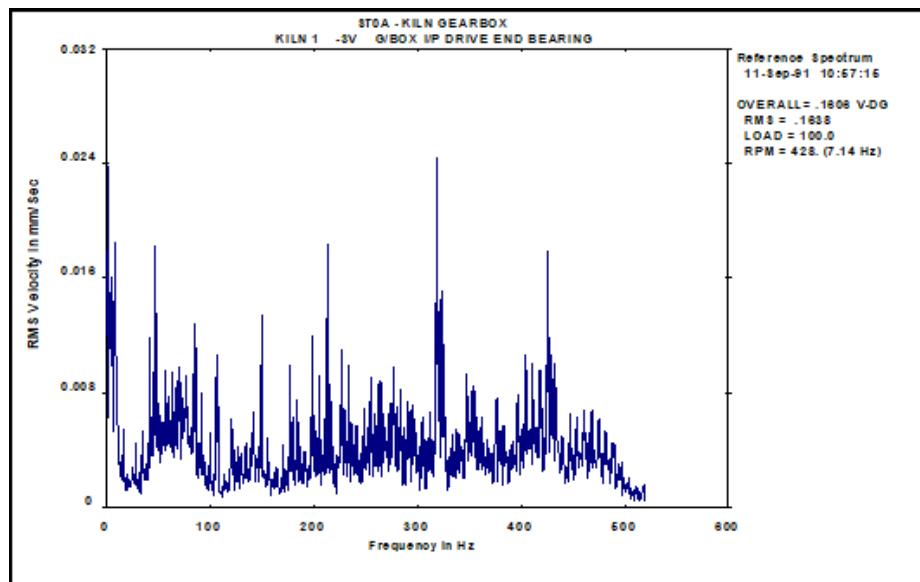


Figura 4-54

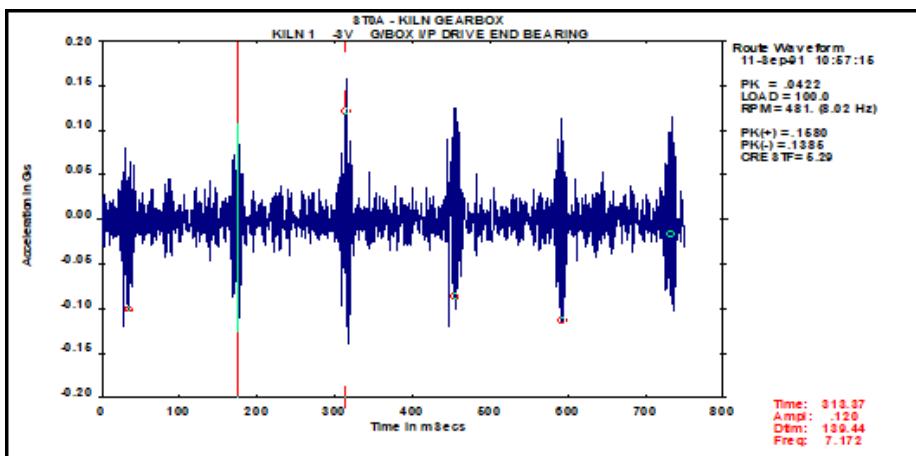


Figura 4-55

Puntos clave

- E1** Los estudiantes deben entender la relación entre período y frecuencia.
(Segundos P = 1 / F Hz)
 - o Calcular frecuencias a partir de eventos en la forma de onda
 - o Calcular el período de velocidad del eje o frecuencia de engrane, etc.
 - o Utilice esta información para elegir la configuración de medición adecuada
- E2** Los estudiantes deben ser capaces de reconocer patrones importantes en formas de onda de tiempo tales como:
 - o Impactos, modulación, transitorios, batido, asimetría, etc.
- E3** Los estudiantes deben ser conscientes de la relación entre los patrones enumerados anteriormente y los fallos comunes de la máquina:
 - o Cajas de engranajes, rodamientos, holgura, desalineación, desbalance, cavitación, correas/bandas dañadas, etc.
- E4** Los estudiantes deben apreciar que algunas fallas mecánicas se detectan más fácilmente en la forma de onda de tiempo que el espectro.

Diagramas circulares

El diagrama circular envuelve la forma de onda alrededor en un círculo. Le da una idea de cómo la vibración está cambiando en relación con la rotación del eje. Esta gráfica es ideal para fallas síncronas como dientes de engranajes, roces, fallas de paletas/impulsores, soltura (e incluso desbalance y desalineación).

Muchos paquetes de software de vibración tienen la capacidad de trazar formas de onda de tiempo de esta manera.

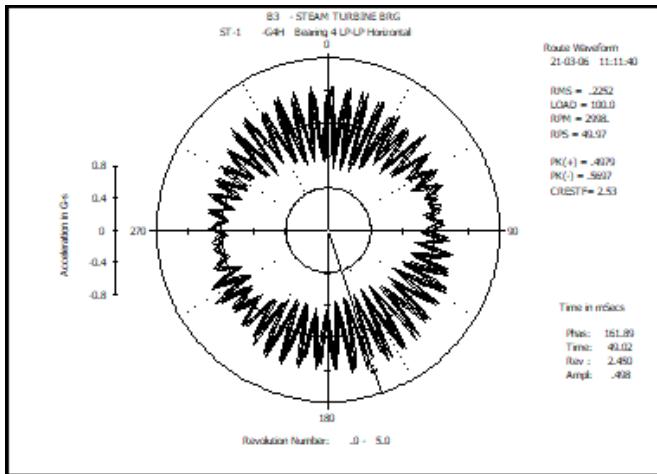


Figura 4-56 Diagrama circular

En el gráfico de abajo se puede ver la relación entre la forma de onda de tiempo en la parte superior y la gráfica circular debajo de ella. Pequeñas flechas rojas apuntan al efecto de un diente de engranaje malo impactando con cada rotación del eje. Se puede ver el diente malo en la gráfica circular como se indica por la flecha roja grande.

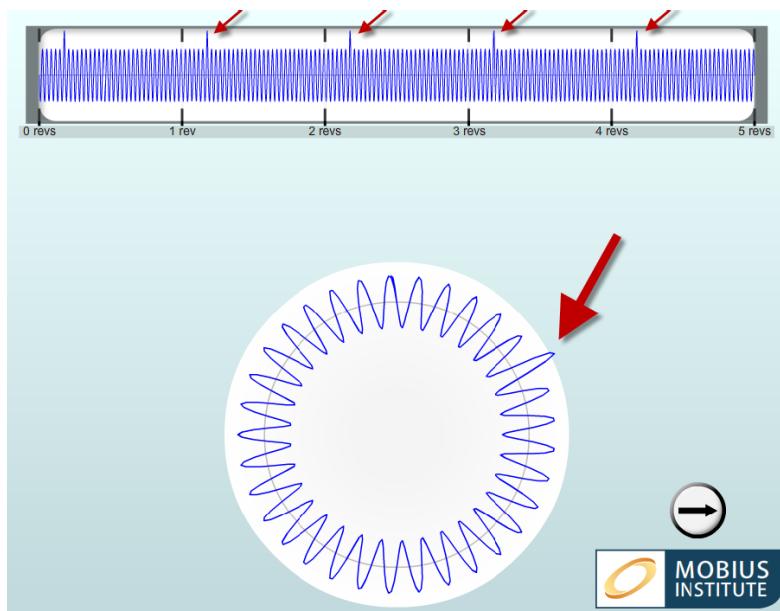


Figura 4-57 Un diente quebrado

Puntos clave

-  Los estudiantes deben ser conscientes de la gráfica circular como una opción para trazar datos de forma de onda de tiempo
-  La gráfica circular es especialmente útil para identificar eventos sincrónicos.