



## Capítulo 3

# Procesamiento de señales

### Temas:

- F** Repaso general
- F** Filtros: paso bajo, paso banda, paso alto
- F** Integración
- F** Muestreo y aliasing
- F** Activación (disparo o triggering)
- F** El proceso FFT
- F** Muestreo y resolución
- F** Rango dinámico
- F** Ventanas y fugas
  - o Hanning, Rectangular/Uniforme
  - o Fuerza y exponencial
- F** Promedio
  - o Promedio lineal
  - o Promedio de superposición o traslape
  - o Promedio de retención de pico
  - o Promedio sincrónico de tiempo
- F** Seguimiento de órdenes y máquinas de velocidad variable

## Introducción

En este capítulo se analiza el proceso de medición de la señal eléctrica desde un sensor de vibración y su manipulación hasta que se convierte en los datos que finalmente usted analiza. Este proceso implica una serie de funciones relacionadas con las opciones de configuración y configuración del recopilador de datos. Estos incluyen, amplificación, filtrado, digitalización, ventanas, promediado, etc.

En la Categoría II se aprendió a configurar el recopilador de datos para realizar pruebas rutinarias en maquinaria rotativa de estado estable que se suelen monitorear en una ruta mensual. En la categoría III obtendrá más información sobre cómo configurar el recopilador de datos para otras pruebas. Por ejemplo, es posible que desee configurar una prueba para optimizar la forma de onda de tiempo para el análisis, es posible que desee iniciar una lectura basada en un disparador o trigger. En este curso también hablaremos sobre pruebas de resonancia y análisis de vibraciones estructurales, incluyendo ODS y análisis modal.

En conclusión, cuando se trata de procesamiento de señal, si no entiende la configuración en el recopilador de datos o si se establecen incorrectamente, los datos que está analizando podrían estar dañados. Cuanto más entienda sobre el procesamiento de señales, más probable será que tenga buenos datos para analizar.

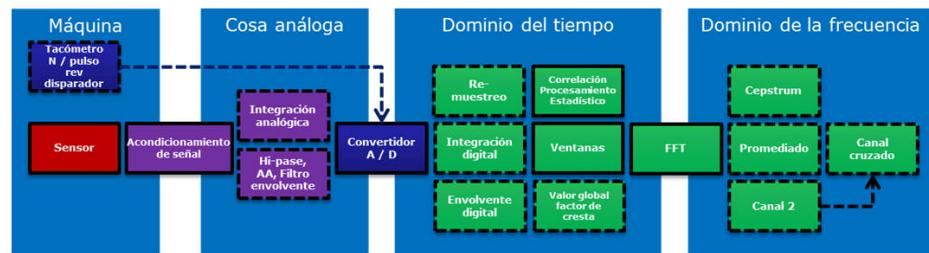
## Un repaso general

El procesamiento de señales se puede dividir en bloques o etapas como se muestra en la figura siguiente. Podemos discutir el sensor, el acondicionamiento de la señal realizado en la señal analógica que sale del sensor, la conversión analógica a digital y el postprocesamiento.



3-1 Bloques de procesamiento de señal

Los bloques de procesamiento de señal se desglosan aún más en la figura siguiente. En esta sección cubriremos cada uno de estos pasos.



3-2 Bloques detallados del procesamiento de señal

## Transductores

Hay tres tipos de sensores principales que nos ocupan en este curso. Sondas de proximidad sin contacto o sondas de corrientes de Eddy, sondas de velocidad y acelerómetros. Miden el desplazamiento, la velocidad y la aceleración respectivamente.

Las sondas de proximidad tienen una salida eléctrica proporcional al desplazamiento. La parte de CA es proporcional al movimiento del eje en relación con la sonda y la parte de CC es proporcional a la posición central media del eje.



Los sensores de velocidad consisten en un imán y una bobina de alambre. El sensor es un dispositivo mecánico, lo que significa que el imán se mueve a través de la bobina de alambre generando una corriente eléctrica proporcional a la velocidad. Estos sensores no se utilizan normalmente para monitoreo de rutas, pero se pueden encontrar en máquinas de balanceo y a veces se utilizan para mediciones en carcasa de grandes cojinetes de deslizamiento.



Figura 3-3 Sensor de velocidad

Hay dos tipos comunes de acelerómetros: los acelerómetros de modo de carga tienen amplificadores externos y suelen ser para aplicaciones de alta temperatura. Los acelerómetros IEPE (ICP) tienen un amplificador interno que requiere un voltaje de polarización del colector de datos para alimentarlos. Los sensores IEPE (ICP) son los sensores más utilizados.

## Acondicionamiento de señal

---

La señal procedente de un acelerómetro necesita ser manipulada de varias maneras para obtener una buena lectura. Se realizarán una serie de pasos que incluyen: Proporcionar voltaje al acelerómetro para alimentar el amplificador IEPE, acoplar la entrada CA, filtrar paso alto la entrada para hacer frente al proceso de integración y amplificar la señal para mejorar el rango dinámico (ganancia). Ahora veremos estos pasos con más detalle.

El primer paso es accionar el circuito ICP. Los sistemas varían, pero esto se logra normalmente proporcionando un voltaje de polarización de 18 a 30 VCC. Nota: ICP es una abreviatura de “circuitio integrado piezoelectrío”, y es una marca comercial registrada de PCB Group, Inc. Hay un estándar similar no propietario llamado IEPE, que significa “Integrated Electronics Piezo Electric”.

La electrónica incorporada convierte la señal de carga de alta impedancia generada por el elemento de detección piezoelectrética en una señal de voltaje de baja impedancia utilizable que se puede transmitir fácilmente a través de cables largos y se utiliza en entornos de fábricas ruidosas con poca degradación.

A continuación, se muestra un esquema del circuito de acondicionamiento de señal IEPE. Tenga en cuenta que, debido a la tensión de polarización de CC, la entrada está acoplada a CA - elimina la compensación de CC en la señal.

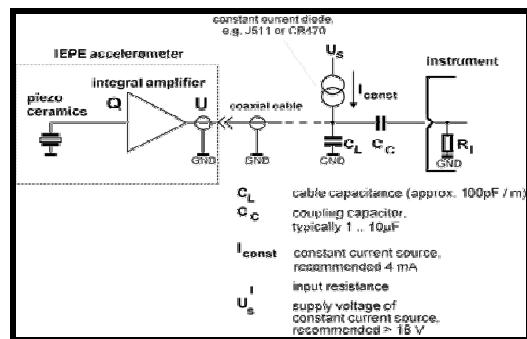


Figura 3-4 Circuito IEPE

## Filtros

Los filtros se utilizan ampliamente en el análisis de vibraciones. Es importante que entienda cómo funcionan los filtros y la terminología del filtro antes de pasar por esta sección. En la instrumentación moderna podemos tener filtros analógicos, utilizados para tratar la señal antes de que se digitalice, y filtros digitales, utilizados para tratar la señal después de que se digitalice.

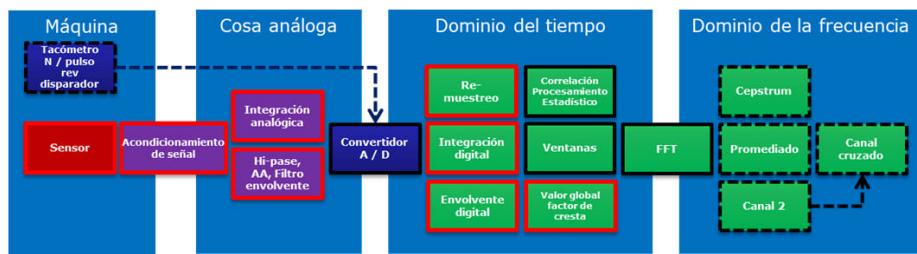


Figura 3-5

Los filtros se utilizan en varias aplicaciones dentro del recopilador de datos. Cuatro de las aplicaciones más obvias son filtros antialiasing, integración (conversión de la señal de aceleración a velocidad), filtros de seguimiento y filtros utilizados en el análisis de rodamientos de alta frecuencia (demodulación, PeakVue, envolvente de aceleración).

Discutiremos la mayoría de estas aplicaciones más adelante en el curso.

## Comprensión de los filtros

Hay tres tipos de filtros que nos conciernen:

- Filtros de paso bajo: permiten que las frecuencias bajas pasen a través de él
- Filtros de paso de banda: permiten que las frecuencias dentro de una banda pasen a través de él
- Filtros de paso alto: permite el paso de altas frecuencias.

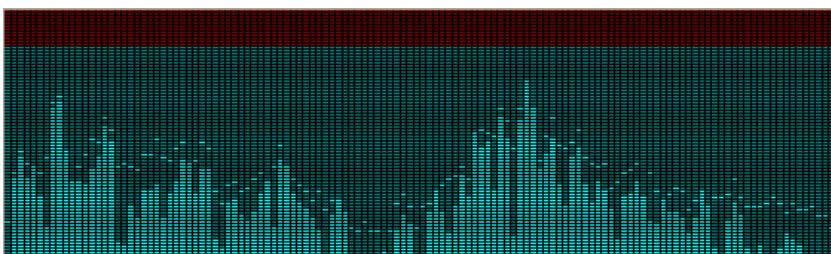


Figura 3-6 Datos de una máquina, sin aplicación de filtro.

**Filtros Paso bajo** son, por mucho, el tipo de filtro más común, ganando amplia popularidad en la eliminación de señales solapadas y para otros aspectos de la adquisición de datos y la conversión de señales. Para un filtro de paso bajo, la banda de paso se extiende desde DC (0 Hz) hasta la frecuencia especificada, y la banda de rechazo se encuentra por encima de la frecuencia especificada.

La Figura 3-7 muestra los mismos datos que la figura anterior, pero con filtro paso bajo aplicado. Está permitiendo ver las frecuencias bajas mientras bloquea las altas.

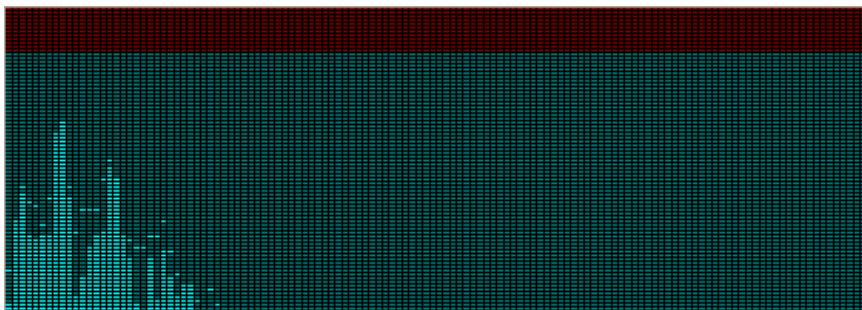


Figura 3-7 Mismos datos, pero aplicando filtro paso bajo.

Filtros **Paso banda** transmiten únicamente las señales en un rango de frecuencia. Un filtro paso banda ideal tendría transiciones rectas en  $f_L$  y  $f_H$ , rechazando todas las frecuencias fuera de ese rango. La aplicación de filtros paso banda incluye situaciones en las que se requiere extraer una frecuencia específica, tal como frecuencias de prueba, de equipos adyacentes o ruido. Ver Figura 3-8.

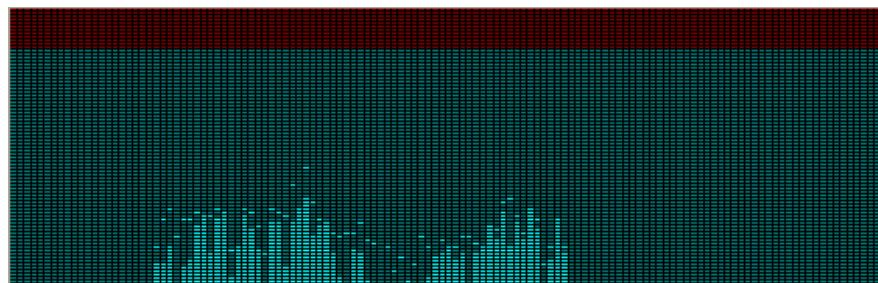


Figura 3-8 Filtro paso banda aplicado. Bloquea las frecuencias altas y bajas.

En un **filtro paso alto**, la banda de paso se encuentra por encima de una frecuencia especificada, mientras que la banda de rechazo reside por debajo de ese punto.

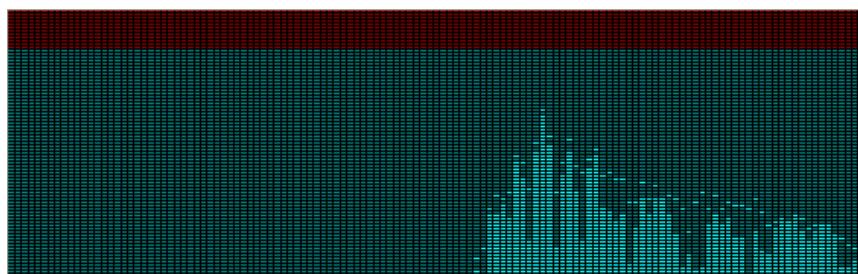


Figura 3-9 Filtro de paso alto bloquea las frecuencias menores a la especificada.

Los filtros paso alto se utilizan normalmente en la detección temprana del desgaste de los rodamientos. Bloquea las frecuencias más bajas y de gran amplitud para permitir que la escala se ajuste a las señales de baja amplitud y alta frecuencia generadas por el desgaste del rodamiento en las primeras etapas de desgaste.

### Filtros de seguimiento

Un filtro de seguimiento es un filtro de paso bajo o un filtro de paso de banda que realiza un seguimiento automático de la señal de entrada versus las rpm. Se utilizan con el fin de realizar un seguimiento para rastrear la velocidad de la máquina con precisión durante los cambios. Es útil en pruebas de arranque y paro para capturar datos de fase junto con el pico de vibración. Algunos filtros de seguimiento pueden realizar un rastreo de múltiplos de 1x. Se utiliza con luces estroboscópicas para acomodar un acelerómetro para generar una señal de una vez por revolución.

### Características del filtro

Dos tipos de filtros son comúnmente utilizados en los campos de la vibración, digital y analógico.

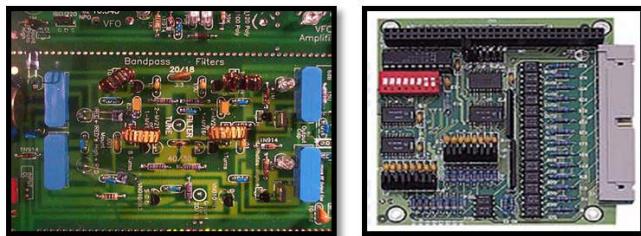


Figura 3-10 Filtros analógicos y digitales

Los filtros digitales se logran con chips o software especiales de “procesamiento de señal digital” (DSP).

Los filtros analógicos se crean con componentes electrónicos como capacitores y resistencias. Muchos analizadores todavía tienen algunos filtros analógicos.

Hay dos puntos que nos ocupan:

- Las características del filtro (el corte)
- Tiempos de ajuste

Idealmente, los filtros bloquearían las frecuencias no deseadas tal cual se colocara una pared recta (ver Figura 3-11). Esto daría un corte limpio y mantendría afuera todas las señales no deseadas. Sin embargo, este no es el caso.

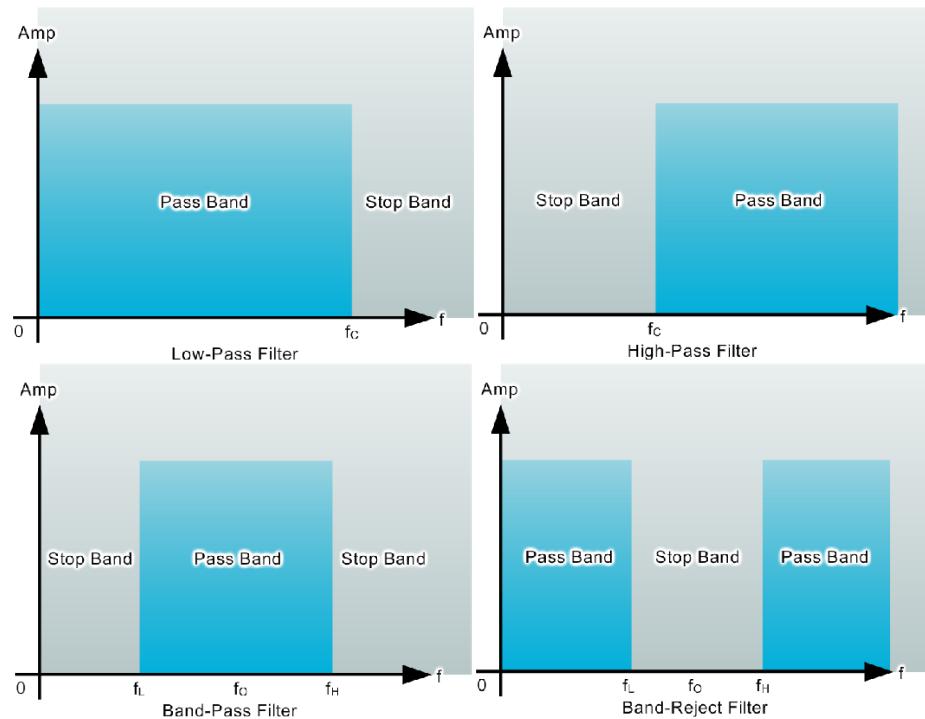


Figura 3-11 Un filtro ideal bloquearía todas las frecuencias no deseadas.

En realidad, especialmente con los filtros analógicos, hay una región donde algunas frecuencias se atenuarán, pero no se bloquearán.

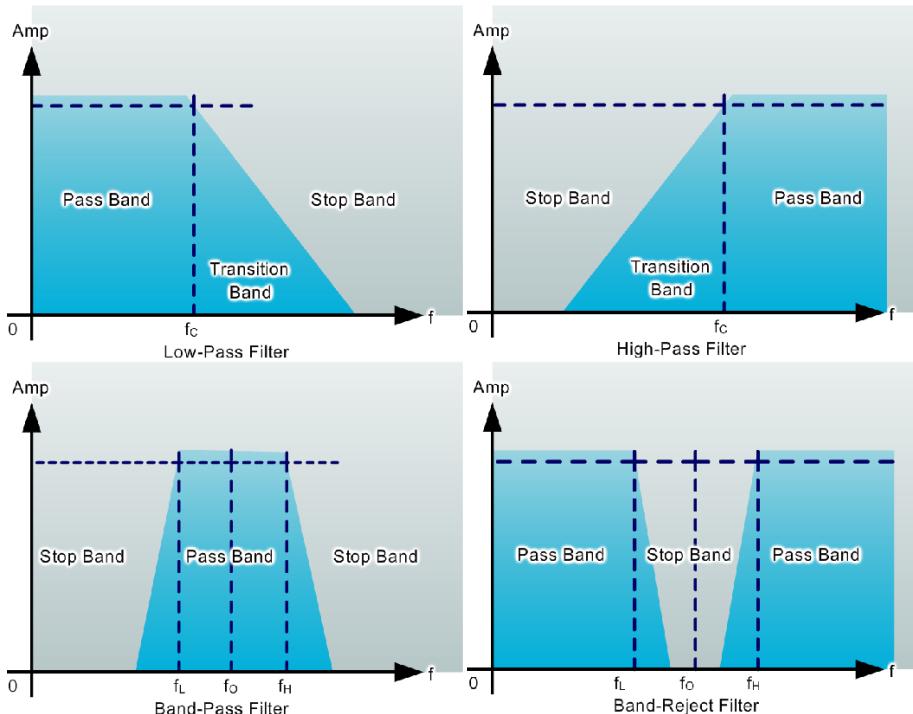


Figura 3-12 Los filtros en la realidad tienen una banda de transición que permiten el paso de algunas frecuencias.

Hay un concepto que es importante entender con respecto a la electrónica de filtro. Cuando los datos se aplican al circuito del filtro, hace que la salida del circuito "suene". Esto requiere que el tiempo de ajuste se establezca durante una duración lo suficientemente larga como para permitir que el circuito se acomode a niveles normales antes de capturar los datos.

Al seleccionar o diseñar filtros, ya sean analógicos o digitales, hay algunas preguntas fundamentales que debemos hacer: ¿Qué tan plana es la banda de paso? ¿Qué tan empinada es la banda de transición? ¿Qué tan plana es la banda de rechazo y cómo se ve afectada la fase en varias frecuencias?

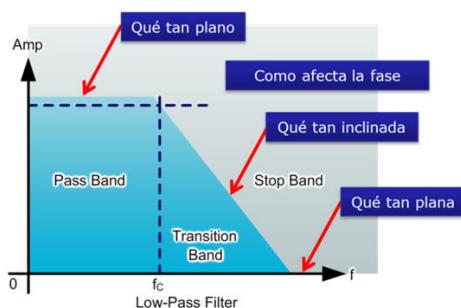


Figura 3-13 Diseño de filtro

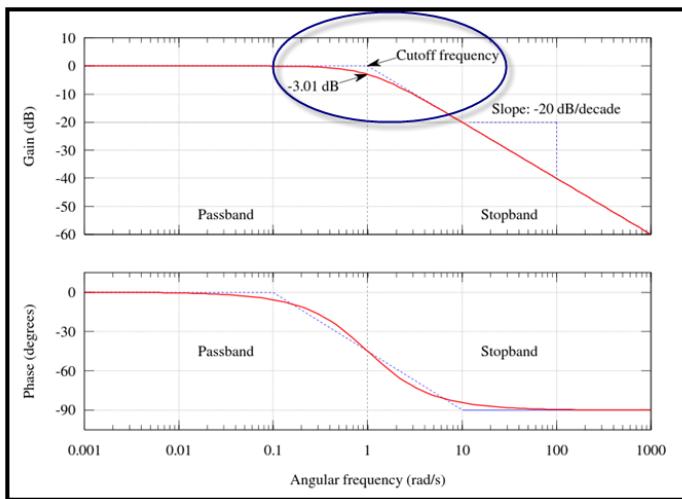


Figura 3-14 Frecuencia de corte del filtro o punto 3 dB

La frecuencia de corte del filtro se define por el punto de media potencia, donde hay una caída de 3 dB en la respuesta.

## Integración, diferenciación y relación señal-ruido

La señal analógica del acelerómetro es proporcional a la aceleración. Normalmente vemos los datos en aceleración o velocidad.

- La conversión de los datos de aceleración a velocidad se denomina “integración”. El reverso del proceso se llama “diferenciación”.
- Para convertir de la aceleración al desplazamiento, el proceso se denomina “doble integración”. Convertir de desplazamiento a aceleración es “doble diferenciación”

Este proceso se puede lograr con circuitos analógicos (un filtro) o se puede realizar digitalmente. Algunos recopiladores de datos ofrecen ambos métodos, mientras que otros proporcionan una opción u otra.

La integración reduce la vibración de alta frecuencia y amplifica la vibración de baja frecuencia (e introduce un cambio de fase de 90°), como se muestra en este ejemplo.

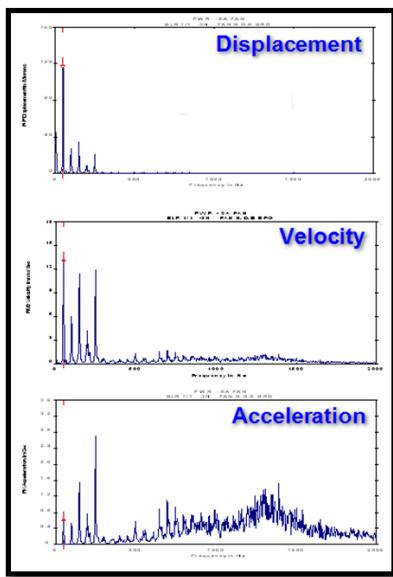


Figura 3-15

La relación entre aceleración y velocidad es  $1/f$  (donde 'f' es frecuencia). [De la aceleración al desplazamiento la conversión es  $1/f^2$ ]

- Si  $f$  es muy pequeño, la velocidad es muy grande.
- Si  $f$  es cero, ¡la velocidad es infinita!

Debido a este hecho, y las características de los filtros:

- Las frecuencias bajas pueden amplificarse por un factor de 10 a 100 veces
- Las altas frecuencias se pueden atenuar

Por lo tanto, se utiliza un filtro de paso alto para eliminar/atenuar las frecuencias bajas.

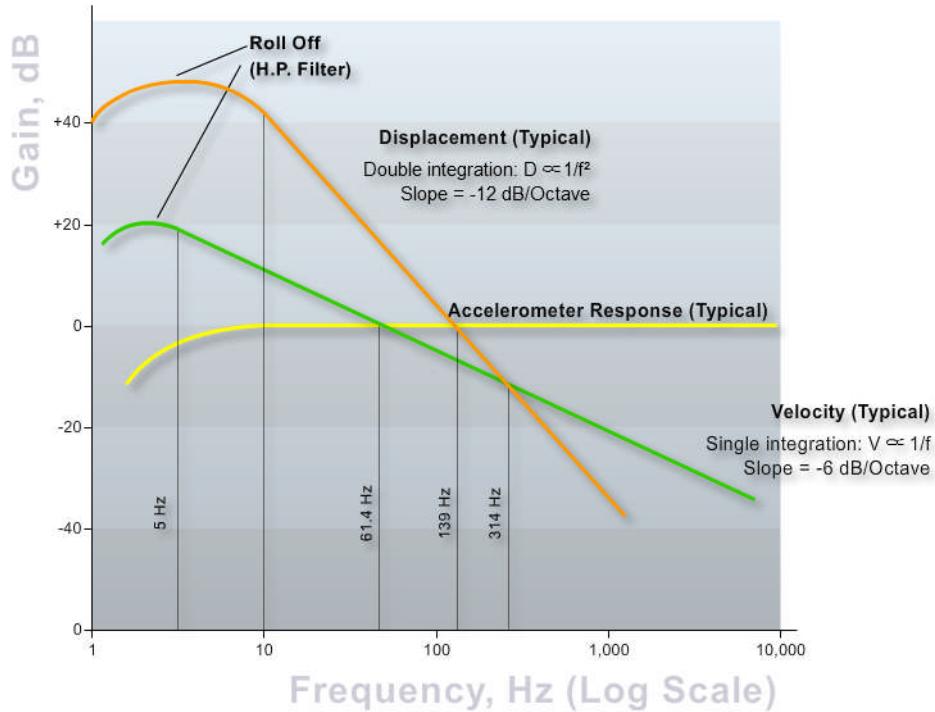


Figura 3-16 - [De SKF CM1001]

### Relación señal-ruido (S/N)

Es muy importante tener una alta relación señal-ruido. No queremos que el ruido enmascare la señal de vibración importante.

El ruido puede provenir de varias fuentes:

- ☐ El ruido puede provenir del propio proceso o de máquinas externas.
- ☐ El ruido puede provenir de dispositivos electrónicos y transductores.
- ☐ La relación S/N puede ser baja si la señal es baja:
  - o La salida del transductor es baja
    - ☐ Sonda de desplazamiento >1KHz
    - ☐ Acelerómetro a baja frecuencia
    - ☐ Máquina silenciosa

Una manera de evitar este problema es evitar la integración.

- ☐ Ver los datos de las sondas de desplazamiento en mils o  $\mu\text{m}$
- ☐ Ver datos de acelerómetros en g's o  $\text{mm/sec}^2$

Algunos sistemas ofrecen integración digital, así como integración analógica. Los beneficios de la integración digital son:

- La señal se digitaliza mientras sigue en aceleración
- Convertido a velocidad (o desplazamiento) en software
- El espectro y opcionalmente la forma de onda de tiempo se pueden convertir a cualquier unidad bajo demanda (Algunos sistemas no pueden integrar la forma de onda).

### ***Integración analógica y digital***

Si utiliza la integración analógica, la forma de onda y el espectro estarán en velocidad. Todos los sistemas pueden convertir el espectro en otras unidades. Si está interesado en la vibración de alta frecuencia, no se integre porque las frecuencias altas están atenuadas. Por otro lado, cuando se integran frecuencias bajas se amplifican por un factor de factor  $1/f^2$ . Surelación señal/ruido podría mejorarse atenuando las frecuencias altas y la amplificación de baja frecuencia se puede manejar con un filtro de paso alto.

La integración analógica se utiliza a menudo para compensar el bajo rango dinámico. Más sobre esto más adelante...

Si utiliza la integración digital, la forma de onda permanecerá en aceleración (unidad cruda del transductor). Se puede convertir a velocidad digitalmente y los filtros digitales de paso alto se pueden aplicar según sea necesario. Los analizadores/instrumentos modernos no tienen limitación de rango dinámico, por lo que la integración digital se está convirtiendo en la norma.

### ***Máquinas de baja velocidad***

El problema de la conversión e integración de unidades es más importante cuando se prueban máquinas de baja velocidad (por debajo de 3 Hz o 180 RPM). La vibración de interés puede ser de baja amplitud, y será de baja frecuencia. Para mejorar la relación señal-ruido:

- Se debe utilizar un acelerómetro especial:
  - Muy bajo ruido
  - Alta sensibilidad (p. ej. 500 mV/g en lugar de 100 mV/g)
- Tenga cuidado con los transitorios térmicos y físicos.
- Monte el sensor en la zona de carga.
- Tenga cuidado con el método de montaje del sensor.

Tenga en cuenta que la respuesta de frecuencia del sensor cambiará si utiliza acelerómetros de alta sensibilidad.

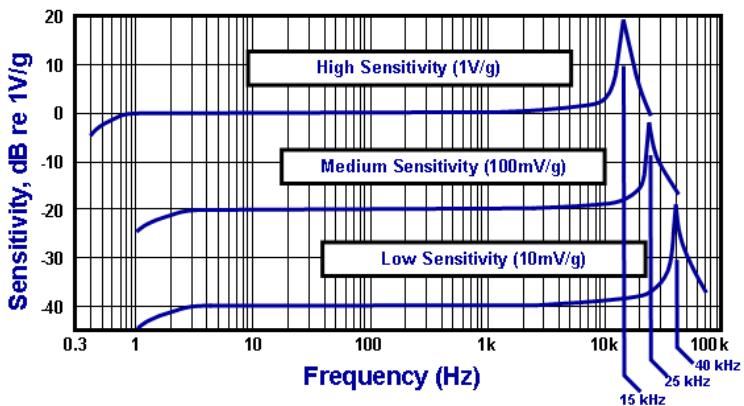


Figura 3-17

¡No olvide el filtro paso alto! La mayoría de los sistemas utilizan un filtro de paso alto con una frecuencia de corte entre 5 Hz y 20 Hz por defecto. La mayoría de los sistemas le permitirán elegir un ajuste de filtro de paso alto. La conclusión es, ¡asegúrese de que no está filtrando la señal que está tratando de medir!

## Puntos clave

- Los estudiantes deben entender el orden básico de los pasos involucrados en el procesamiento de la señal.
- Los estudiantes deben ser capaces de reconocer los filtros de paso alto, paso bajo y paso de banda.
- Los estudiantes deben ser conscientes de las características del filtro y los problemas de diseño incluyendo: banda de transición, banda de rechazo, precisión de fase, etc.
  - Tenga en cuenta los filtros digitales y analógicos
- Los estudiantes deben entender la diferencia entre la integración digital y analógica
  - ¿Qué sucede a frecuencias muy bajas y a altas frecuencias cuando se integran los datos?
  - ¿Por qué se utiliza a menudo un filtro de paso alto (10 Hz) al integrar datos?
  - ¿Qué sucede si desea medir frecuencias bajas?

## Amplificación y ganancia

Después de filtrar la señal analógica en las formas que acabamos de mencionar y tal vez también integrarla, nos queda una señal analógica que está lista para ser digitalizada. El convertidor analógico a digital (A/D) está diseñado para tomar un rango de entrada específico de voltajes y convertirlos en valores digitales, como se explica en breve. Necesitamos utilizar completamente ese rango de entrada, lo que significa que es posible que necesitemos amplificar la señal para que llene el rango.

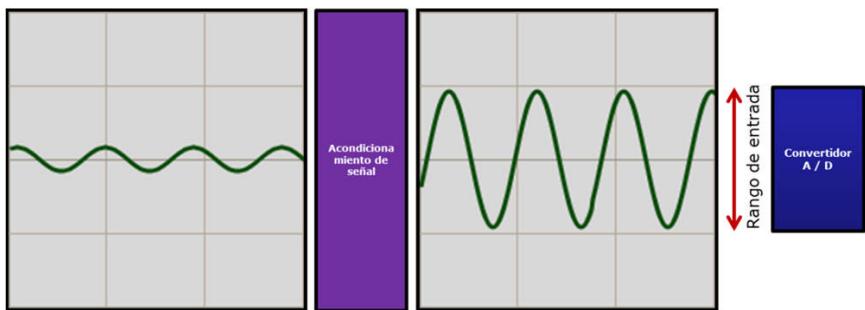


Figura 3-18 Amplificando la señal analógica

Se puede pensar en esto como tratar de enfocar la cabeza de alguien para llenar todo el marco cuando usted está tomando una fotografía de retrato. Si toma la foto desde lejos para que la cabeza de la persona sea sólo un punto en el marco, la cabeza no tendrá muchos píxeles para definirla y la foto no saldrá bien.

Algunos sistemas utilizan un proceso de “rango automático” para optimizar la ganancia o para dimensionar automáticamente la señal al rango de entrada del convertidor A/D. Esto era especialmente importante en sistemas antiguos donde había menos bits de resolución disponibles. El rango automático puede ser difícil si las señales medidas cambian de amplitud durante el proceso de ajuste del rango. El rango automático también tomó tiempo y retrasó la recopilación de datos. El proceso también podría amplificar accidentalmente la señal demasiado y sobrecargar la entrada.

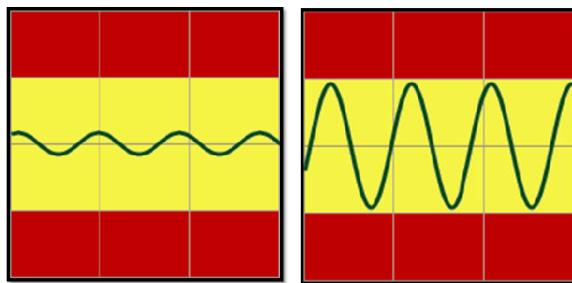


Figura 3-19 Amplificando la señal para llenar el rango de entrada

La figura anterior muestra la señal original que se está amplificando para llenar el rango amarillo. Esto es lo que nos gustaría lograr. Al igual que la cabeza de alguien está perfectamente posicionada en el marco de la cámara para una toma de retrato.

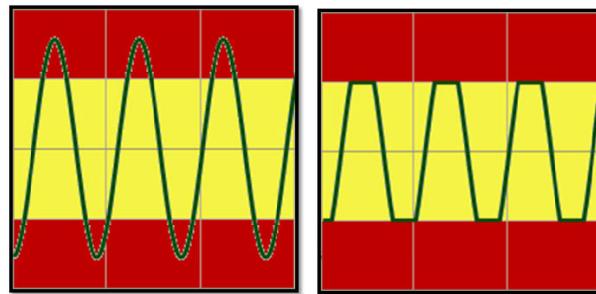


Figura 3-20 Una señal sobre cargada se cortará

Si la señal es demasiado grande para el rango de entrada, se recortará. Esto puede resultar en armónicos inesperados en el espectro o un ski-slope. El recopilador de datos puede darle una indicación de que el rango de entrada de señal es demasiado grande, pero también podría no hacerlo.

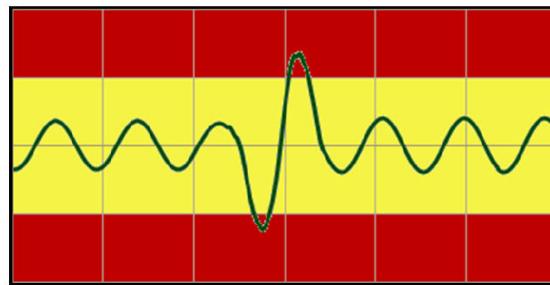


Figura 3-21 ¡Rango automático no luce así!

Si la señal que está tratando de medir no es consistente, como en la figura anterior, la rutina de rango automático podría quedar atascada en un lazo. Intenta ajustar la ganancia, ve que la señal es demasiado alta, baja el ajuste de ganancia, ve que la señal es demasiado baja, la eleva de nuevo, etc.

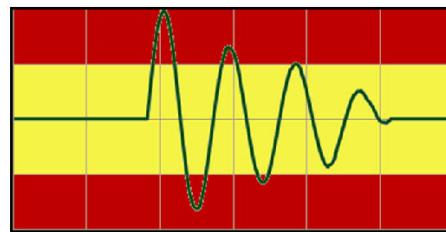


Figura 3-22 Prueba de impacto

Más adelante en el curso hablaremos de pruebas de impacto y pruebas de martillo calibradas para la resonancia. En estas pruebas, la máquina o estructura no está vibrando en el momento

que se golpea con un martillo o un pedazo de madera. Imagínese cómo el rango automático manejaría esta situación. Al no ver ninguna vibración establecería un ajuste de ganancia muy alto y cuando el objeto es golpeado por el martillo sobrecarga el sistema porque el rango automático no puede ajustarse tan rápido. Por lo tanto, al hacer una prueba de impacto es importante desactivar el rango automático, hacer algunos golpes de práctica para ver qué tan altos son los niveles y luego establecer un ajuste de ganancia fija para obtener la señal para llenar el rango.

## Rango dinámico

Hablamos de amplificar nuestra señal analógica desde el sensor para encajar bien dentro de los límites del convertidor A/D. También hablamos de manipular la señal de varias maneras, filtrar, integrar, etc., para optimizarla para la medición. Lo que aún no hemos discutido son los límites de nuestro equipo (colector de datos y sensor) en términos de su capacidad para medir señales de baja amplitud en presencia de señales de alta amplitud.

Las señales de vibración a menudo están dominadas por señales de alta amplitud, pero pueden ser las señales de muy baja amplitud las que nos hablan sobre el estado de la máquina. El rango dinámico es una medida de la capacidad de 'ver' señales pequeñas en presencia de grandes. Es una relación de la señal más pequeña a la más grande, y se representa típicamente en decibelio (dB).

$$\text{Rango dinámico} = 20 \times \log \left( \frac{\text{señal más grande}}{\text{señal más pequeña}} \right)$$

Un rango dinámico "amplio" significa que podemos resolver señales muy pequeñas en presencia de señales muy grandes. En teoría, el rango dinámico depende únicamente de la resolución del convertidor A/D. Sin embargo, en realidad, la electrónica del colector de datos (incluidos los componentes de acondicionamiento de señal, amplificación y filtrado) añade ruido al sistema reduciendo así el rango dinámico (porque el ruido inunda las señales de menor amplitud). Muchos de los recolectores de datos más antiguos del mercado tienen convertidores A/D de 12 bits, lo que les da un rango dinámico teórico de 72 dB.

$$\begin{aligned} &12 \text{ bits son } 4096 \text{ valores posibles } (2^{12} = 4,096) \\ &\text{Obtenemos } 72 \text{ dB de } 20 \times \log (1/4096) \end{aligned}$$

El rango dinámico, como se ha señalado, está relacionado con el número de bits en el convertidor A/D. Para calcularlo, sube 2 a la potencia del número de bits en el A/D. Si tiene 12 bits, sería  $2^{12}$  esto se convierte en la "señal más grande" en la fórmula anterior y la señal más pequeña es "1".

Los colectores de datos desarrollados más recientemente tienen convertidores A/D de 24 bits que proporcionan un rango dinámico teórico de 144 dB. El rango dinámico real está limitado por el ruido en el sistema. 95 dB es común en estos días. Los recopiladores de datos también tienen varios rangos de entrada para que las señales entrantes se puedan amplificar.

Otra forma de entender esto es pensar en ello en términos de cuántos puntos de datos tiene dentro de su rango de entrada para el A/D. Volviendo al ejemplo de tomar la foto de alguien y tratar de centrar su cabeza en el marco, si el marco tenía un total de 1000 píxeles verticalmente, y la cabeza de las personas estaba perfectamente centrada en el marco, entonces habría 1000 puntos de datos que describen la cabeza de la persona.

Ahora imagine tener 10,000 píxeles verticalmente en el marco. Si sólo necesita 1000 píxeles para obtener una buena toma de la cabeza de la persona, ¿importa mucho ahora si su cabeza está perfectamente centrada en el marco? Se podría decir que mientras su cabeza esté en el marco, probablemente obtendrá una toma decente si tiene tantos píxeles.

Volviendo a la última sección, hablamos mucho sobre la manipulación de los datos mediante la integración analógica, filtros y rango automático para conseguir que los datos se ajusten bien en el marco. Mucho de esto se hizo porque no había tantos puntos de datos en el marco, por lo que los datos realmente tenían que ser optimizados para obtener una buena lectura. Con los colectores de datos de 24 bits de hoy en día, esto es menos un problema. Así que usted puede utilizar la integración digital y tal vez establecer un ajuste de ganancia manualmente en lugar de rango automático. Esto es como decir que si tienes una cámara digital de 40 megapíxeles, puedes estar bastante lejos de alguien cuando tomas su foto y todavía obtienes muy buenos detalles en su cara para un retrato.

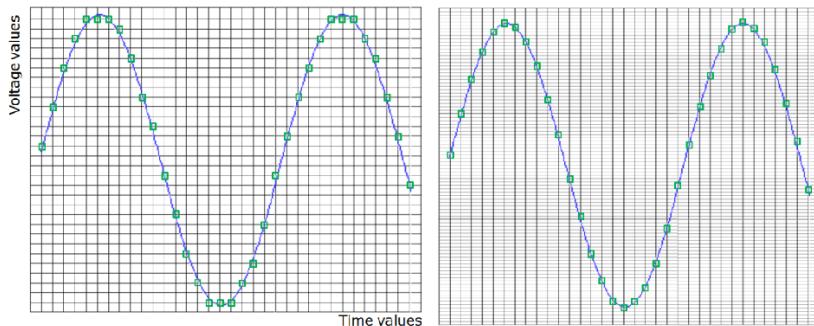


Figura 3-23 Menos celdas en la izquierda que en la derecha

## Puntos clave

- FO El rango dinámico es la relación entre la señal más grande y la más pequeña que se puede medir
  - o Se da en dB
  - o Está relacionado con el número de bits en el convertidor A/D
- FO La relación señal/ruido (S/N) es la relación entre la amplitud más grande y la más pequeña en una medición en particular
- FO El acondicionamiento de la señal se utiliza para mejorar la relación S/N. Incluye:
  - o Integración analógica
  - o Filtrado
  - o Rango automático
  - o Usando el sensor correcto, etc.
- FO Algunas estrategias de acondicionamiento de señales se vuelven menos importantes si tiene un mayor rango dinámico.

## El proceso de digitalización

Ahora que la señal analógica ha sido manipulada, filtrada, ajustada y optimizada, es hora de digitalizarla.

### ***Muestreo de la señal y frecuencia de muestreo***

Cuando el transductor se coloca en la máquina, su salida eléctrica es una señal analógica continua que representa la vibración en esa ubicación.

Contiene toda la información disponible de la máquina, proporcional a la velocidad, desplazamiento o aceleración, dependiendo del tipo de transductor.

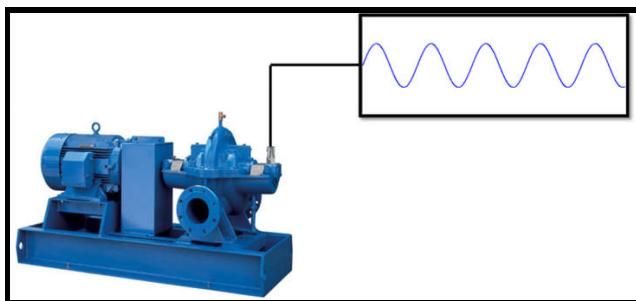


Figura 3-24 Señal analógica continua del sensor

La señal debe digitalizarse para permitir que el analizador procese, visualice y almacene la vibración. Para ello, la señal analógica continua se convierte en una serie de números discretos llamada **registro de tiempo**.

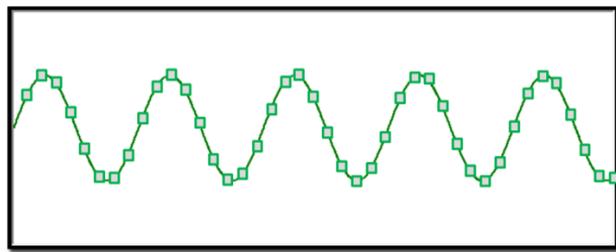


Figura 3-25 La forma de onda de tiempo se muestrea en intervalos discretos. Cada punto es una muestra individual. La razón de muestreo se llama frecuencia de muestreo

La Figura 3-25 muestra el proceso de digitalización de una señal de tiempo estándar. Se ha marcado donde se ha obtenido una muestra en intervalos discretos de tiempo. Las muestras se convierten en números y se almacenan para que se pueda construir la señal de onda y después el FFT.

La velocidad a la que se muestrea la forma de onda se llama **Frecuencia de muestreo**. Es el número de muestras obtenidas en un segundo.

Para representar la forma de onda de tiempo, el recopilador de datos solo tiene las muestras individuales con las que trabajar. Todo lo que pasó entre las muestras se pierde. Cuando el recopilador de datos o el software dibuja la forma de onda de tiempo simplemente “conecta los puntos”. Esto se denomina **Dominio de tiempo**.

Por lo tanto, lo que realmente se almacena en el recopilador de datos no es tan detallado como la señal analógica continua original.

## Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier o FFT es un algoritmo digital que convierte una forma de onda de tiempo en un espectro. Convierte el dominio de tiempo en el dominio de frecuencia. La fórmula para el FFT se muestra en la figura siguiente.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

**FASE**

Figura 3-26 El FFT

- $x(k)$  = muestras de forma de onda de tiempo
- $N$  = índice de muestra

- N = longitud del récord (por ejemplo, 1024, 2048, 4096, etc.)
- K = cada celda (bin) de frecuencia
- X(k) = Transformación discreta de Fourier de x(k)

### Registro del Tiempo y FFT

Un registro de tiempo se define como N muestras consecutivas e igualmente espaciadas de la entrada. Por razones computacionales, N es una potencia de dos; típicamente 1024, 2048 o 4096.

El FFT es un cálculo que crea un espectro a partir del registro de tiempo. El espectro resultante contiene realmente  $n/2$  líneas (es decir, 512, 1024, 2048) – esto se explicará más adelante en la sección de aliasing (solapamiento).

El espectro sólo obtiene la mitad de los números para trabajar con porque cada línea de frecuencia contiene realmente dos piezas de información, amplitud y fase. La fase se descarta.

Tenga en cuenta que los términos: “bins” o “líneas”, no “muestras” se utilizan al discutir el espectro.

- $N = 2^9 = 512 \rightarrow 256$  números
- $N = 2^{10} = 1024 \rightarrow 512$  números
- $N = 2^{11} = 2048 \rightarrow 1024$  números
- $N = 2^{12} = 4096 \rightarrow 2048$  números
- $N = 2^{13} = 8192 \rightarrow 4096$  números

Para que la FFT funcione correctamente tenemos que lidiar con tres problemas: **Aliasing** - necesitamos al menos dos muestras por ciclo si queremos resolver una frecuencia en particular. **Fuga**, es una pérdida de resolución cuando los ciclos no son perfectamente periódicos en el registro de tiempo. **Resolución** (“efecto valla”). Sólo tenemos datos en frecuencias específicas que representan todo dentro de esa banda.

Ahora describiremos estos tres puntos con más detalle.

### **Teorema/Criterio de Nyquist**

La frecuencia de muestreo afecta al rango de forma de onda que se puede reconstruir.

En la Figura 3-27 una señal de 50 Hz se muestrea con una tasa de muestreo de 50 veces por segundo (50 HZ). Esto significa una muestra por ciclo. Si conectamos las muestras, obtenemos una línea recta. No se puede construir la onda. No hay suficientes muestras.

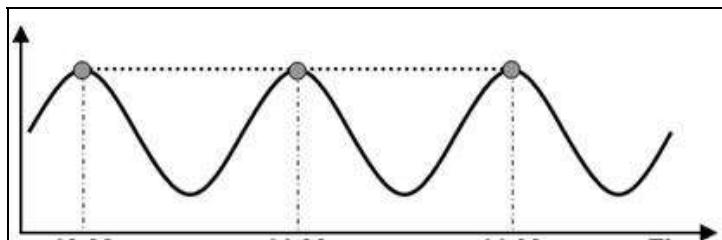


Figura 3-27 Una señal de 50 Hz muestreada a una tasa de 50 veces por segundo resulta en una muestra por segundo. Se conectan los puntos en y forma una línea recta.

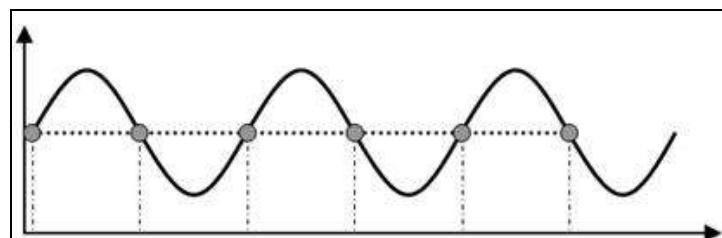


Figura 3-28 La señal de 50Hz se muestrea a una tasa de 100 Hz. Al conectar los puntos aún es una línea recta.

En la Figura 3-28 la tasa de muestreo se ha duplicado a 100 Hz. Pero al conectar los puntos el resultado sigue siendo una línea recta. Aún no hay suficientes puntos de muestreo para reconstruir la onda. La onda debe ser muestreada a una tasa mayor que el doble de la frecuencia de la onda.

El **Teorema de Nyquist** o **Criterio Nyquist** indica que la forma de onda debe muestrearse a una velocidad superior al doble de la señal de entrada. Esta frecuencia se conoce a menudo como la frecuencia de Nyquist.

La mayoría de los analizadores digitales muestrean 2.56 veces la frecuencia máxima de interés. Una medición de vibración digital consiste en un gran número de muestras, suficiente para ser representativa para el registro de tiempo. La velocidad a la que se toman estas muestras depende de la frecuencia máxima que se mostrará cuando se produzca el espectro.

La frecuencia de muestreo debe ser superior al doble de la frecuencia máxima en el espectro. Para obtener una línea de espectro a 400 Hz debe tomar muestras a más rápido que  $f_s = 800$  Hz, es decir, colectar más de 800 lecturas por segundo. Esto significa que hay menos de 0.00125 segundos para cada lectura.

Como se explicará en breve, usamos 2.56 como multiplicador. Si la frecuencia máxima de interés (a menudo llamada  $F_{max}$ ) es de 400 Hz, la **frecuencia de muestreo** sería de  $400 \times 2.56 = 1024$  veces cada segundo.

Podemos controlar 2 parámetros: La frecuencia de muestreo y el número total de muestras colectadas. La frecuencia de muestreo se controla seleccionando el  $F_{max}$ . El Número de muestras se define mediante las Líneas de resolución.

**La frecuencia de muestreo debe ser superior al doble de la frecuencia máxima en el espectro**

Tiempo de muestreo:  $T_s$

Frecuencia de muestreo:  $F_s$  ( $F_s = 1/T_s$ )

Teorema de Nyquist:  $F_s > 2 \times F_{max}$  en la práctica  $F_s = 2.56 \times F_{max}$

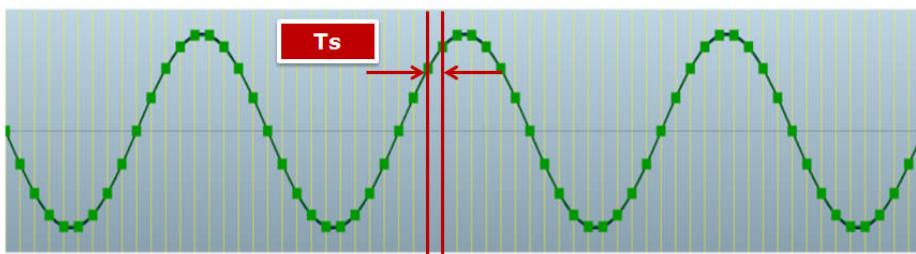


Figura 3-29 Tasa de muestreo

En esta sección de procesamiento de señales del curso, explicaremos la fórmula a continuación y definiremos cada uno de sus términos con más detalle a medida que avanzamos.

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

Figura 3-30 Fórmula importante de procesamiento de señales

- T Tiempo de medición o duración del registro de tiempo
- $T_s$  Tiempo entre muestras o período de muestra
- $F_s$  Frecuencia de muestreo o frecuencia de muestra
- N Longitud del registro (p. ej. 1024, 2048, 4096, etc.) o el número de muestras en la forma de onda del tiempo
- Líneas Líneas de resolución en el espectro (por ejemplo. 400, 800, 1600, etc.)
- $F_{max}$  Frecuencia máxima en el espectro

## Aliasing (solapamiento de señales)

Muestreo significa que medimos un evento en tiempo real en un número de puntos y luego tratamos de reconstruirlo al conectar esos puntos. Si no muestreamos lo suficientemente rápido, la reconstrucción no corresponderá al evento. En la Figura 3-31, la curva reconstruida tiene la amplitud correcta pero el periodo erróneo. Este efecto se llama "aliasing" y debe ser corregido.

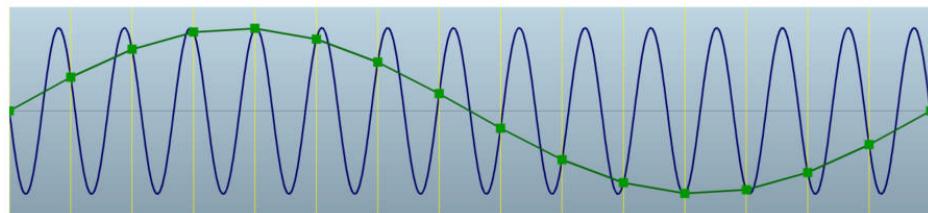


Figura 3-31 Los efectos del aliasing es que genera una figura falsa. La amplitud es correcta pero no el periodo. Se dice que dos señales se solapan si la diferencia de sus frecuencias cae en el rango de frecuencias de interés. Esta frecuencia de diferencia siempre se genera en el proceso de muestreo.

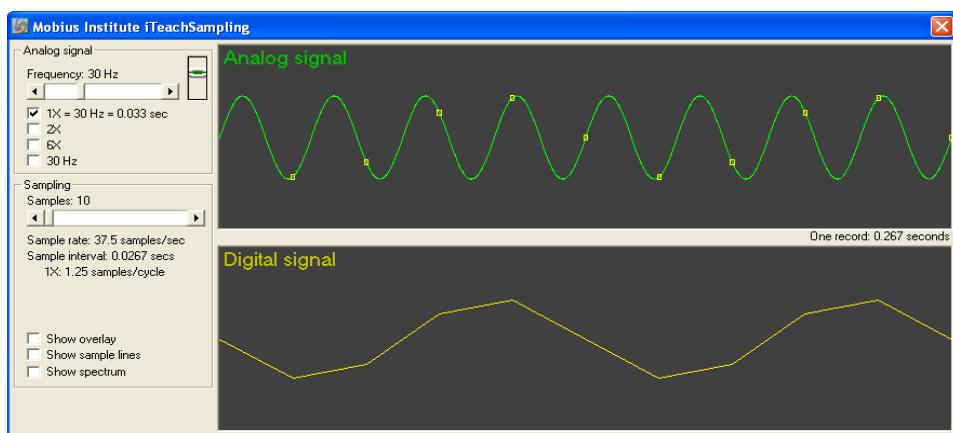


Figura 3-32 La señal analógica enseña los puntos de muestreo y la reconstrucción digital.

En la Figura 3-32 la señal analógica no es muestreada a una tasa lo suficientemente rápida para reconstruirla. En su lugar, se genera una onda con frecuencia mucho menor. Note que la señal analógica es una señal real, pero no hay muestras suficientes para reconstruirla de forma precisa. La onda reconstruida tiene una frecuencia mucho menos, es una señal solapada, una señal que parece real en el espectro pero en realidad no existe.

### ***La conclusión sobre el aliasing***

Se toman dos pasos para eliminar los efectos de aliasing

En primer lugar, se aplica un filtro de paso bajo ( $F_{max}$ ) antes del muestreo para que se eliminen los componentes de señal que pueden haber sido solapados.

En segundo lugar, recuerde que para cada muestra  $N$  en el registro de tiempo, la FFT produce un espectro con cantidad de líneas  $N/2$ . Por lo tanto, un registro de tiempo de muestra de 2048 produce un espectro de 1024 líneas. Sin embargo, para corregir por antialiasing, solo se

mantienen 800 líneas. La regla aceptada es que el número de líneas en el espectro es igual al número de muestras en el registro de tiempo dividido por 2.56.

- N =  $2^8$  = 256 → 100 líneas
- N =  $2^9$  = 512 → 200 líneas
- N =  $2^{10}$  = 1024 → 400 líneas
- N =  $2^{11}$  = 2048 → 800 líneas
- N =  $2^{12}$  = 4096 → 1600 líneas
- N =  $2^{13}$  = 8192 → 3200 líneas

### **Delta – Método Sigma**

Desde el advenimiento de los procesadores de señales digitales, ahora hay dos maneras de resolver el dilema del aliasing. Una es utilizar un filtro antialiasing analógico y el otro es “sobremuestrear” la señal entrante (es decir, muestrearla más rápidamente de lo necesario) y utilizar el filtrado “digital” y el “remuestreo” para reconstruir la señal de interés. Este proceso se denomina método “sigma-delta”.

La mayoría de los recopiladores de datos modernos ahora emplean el método sigma-delta, ya que tiene un mejor rendimiento y son menos costosos de fabricar. En realidad utiliza un filtro mucho más eficaz que permitiría mantener muchas más líneas en el espectro. Para la convención, la industria ha mantenido el mismo número de líneas que usamos en el pasado.

### **Puntos clave**

---

- Los estudiantes tendrán que entender la fórmula a continuación.
  - o Se proporcionará en el examen.
- Los estudiantes deben estar familiarizados con la FFT
  - o N valores entran (por ejemplo, la forma de onda de tiempo digitalizada)
  - o Se calculan los valores de amplitud N/2 y fase N/2 (el espectro)
  - o Los valores N/2.56 se mantienen para evitar el aliasing
- Los estudiantes deben estar familiarizados con el criterio de Nyquist
  - o Tasa de muestreo y aliasing
  - o Comprender el método Delta – Sigma

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

## Muestreo y resolución

Echando un vistazo más de cerca al proceso de muestreo conduce a algunas conclusiones. La frecuencia de muestreo debe ser 2.56 veces la frecuencia más alta de interés. Para recrear una señal de 1000 Hz se requiere una frecuencia de muestreo de 2560 Hz. Esto produce un espectro con un  $F_{max}$  (frecuencia máxima) de 1000 Hz. Esto produce la regla #1

### Regla #1

Tasa de muestra es proporcional a la frecuencia máxima ( $F_{máx}$ )

$$F_s = 2.56 \times F_{máx}$$

Otra relación para recordar involucra la forma de onda y el espectro. El número de muestras en la forma de onda de tiempo determina el ancho de banda o la resolución en el espectro. En la mayoría de los analizadores, el **ancho de banda o resolución** es establecido por el “**número de líneas**” elegido por el operador. Este número se conoce como **Líneas de resolución o LOR**.

Una “línea” es un punto de datos en el espectro. A veces se conoce como una celda o bin. Dos frecuencias no se pueden resolver si están más juntas que las líneas. El ancho de banda o la resolución de cada línea se calcula dividiendo el  $F_{max}$  por el número de líneas.

Por ejemplo, un espectro con una frecuencia máxima de 1000 Hz y 400 líneas da como resultado una resolución máxima de  $1000 / 400 = 2.5$  Hz. Esto significa que dos frecuencias discretas aparecerán como una si están más cerca de 2.5 Hz de distancia.

Si las líneas de resolución se incrementan a 800 líneas, la resolución es  $1000 / 800 = 125$  Hz.

Pero esta no es toda la historia. Hay un vínculo entre el número de líneas en el espectro y el número de muestras en el registro de tiempo. El número de muestras requeridas es **2.56 veces el número de líneas (LOR)**. Para 400 líneas en el espectro, el número de muestras es de  $400 \times 256 = 1024$ . La regla #2 en su ámbito más amplio es:

## Regla #2

Número de muestras 'N' es proporcional a resolución

$$N = 1024 \rightarrow 400 \text{ líneas}$$

$$N = 2048 \rightarrow 800 \text{ líneas}$$

$$N = 4096 \rightarrow 1600 \text{ líneas}$$

$$N = 8192 \rightarrow 3200 \text{ líneas}$$

$$N = 16384 \rightarrow 6400 \text{ líneas}$$

El resultado neto es que se puede lograr una buena resolución. Requiere un mayor número de muestras y aumenta el tiempo para recopilar los datos.

Para resolver las frecuencias que están juntas, se necesitan más muestras.

### **Tiempo de muestreo (T)**

Hay un intercambio de resultados vs. tiempo. Cuanto más rápido se muestreen los datos, más datos se recopilan, que deben almacenarse, transferirse, graficarse y utilizarse en los cálculos. Cuantos más datos se recopilen para obtener una mayor resolución, más tiempo se tarda en recopilarlos, lo que significa más tiempo en la máquina.

El tiempo necesario para colectar las muestras es igual al número de muestras requeridas, dividido por la frecuencia de muestreo.

Por ejemplo: un  $F_{\max}$  de 400 Hz establece la frecuencia de muestreo en 1,024 Hz. Una resolución de 400 líneas establece el número de muestras en 1,024. Por lo tanto, el tiempo de la muestra es de  $1024 / 1024 = 1$  segundo.

Otra forma de calcular el tiempo para un promedio es utilizar los números que podemos controlar, es decir, el  $F_{\max}$  y LOR, así que  $T = \text{LOR} / F_{\max}$ . El uso de esta fórmula simplificada para el ejemplo anterior produce...  $T = 400\text{LOR} / 400\text{Hz } F_{\max} = 1$  segundo.

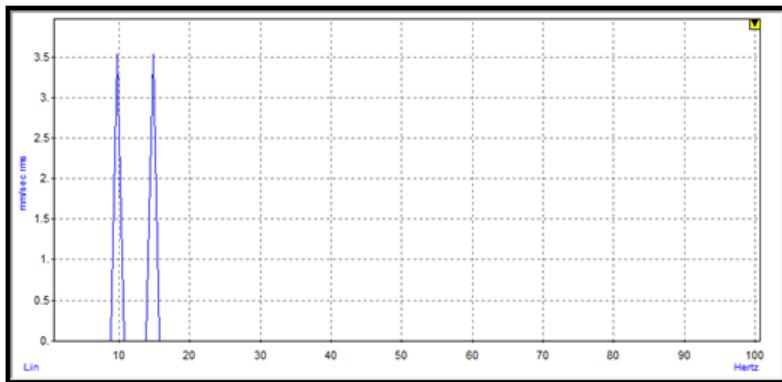
Otro ejemplo utilizando la fórmula simplificada para un  $F_{\max}$  de 100 Hz y 12,800 líneas de resolución...  $T = 12,800\text{LOR} / 100\text{Hz } F_{\max} = 128$  segundos para colectar un promedio.



Figura 3-33

La siguiente ilustración muestra parte de un espectro con un rango de hasta 800 Hz. Tiene 800 líneas de resolución. La resolución de frecuencia es el  $F_{\max}$  / número de líneas o  $F_{\max} / \text{LOR}$ .  
 $800 / 800 = 1\text{Hz}$

- Resolución de frecuencia =  $F_{\max}$  / número de líneas
- (Dos señales: 10 Hz y 15 Hz)



- Rango de 0 - 800 Hz / 800 líneas = resolución 1.0 Hz

Figura 3-34

La Tabla 3-1 lista el número creciente de líneas para un  $F_{\max}$  constante, mostrando la resolución o ancho de banda, tasa de muestreo, número de muestras y tiempo de muestreo.

Número de líneas	$F_{\max}$ (Hz)	Resolución (Hz)	Frecuencia de muestreo	Número de muestras	Tiempo de muestreo (seg)
400	1000	2.50	2560	1024	0.4
800	1000	1.25	2560	2048	0.8
1600	1000	0.63	2560	4096	16
3200	1000	0.31	2560	8192	3.2
6400	1000	0.16	2560	16384	6.4

Tabla 3-1 Efecto de la resolución en el tiempo de muestreo.  $F_{\max}$  y por consiguiente el tiempo de muestreo, son constantes.

## Puntos clave

- Los estudiantes tendrán que entender la relación entre el tiempo de muestreo ( $T$ ) y las líneas de resolución (LOR) y entre LOR y  $N$
- Entender lo que se entiende por resolución en el espectro
  - o  $R = F_{\max} / \text{LOR}$
  - o Una “R” más pequeña es una resolución “más alta”
- Entender que más no siempre es mejor
  - o  $1/R = T$
  - o Esto significa que un espectro de resolución más alta toma más tiempo para la colección

## Ventanas

Hay otra propiedad de la FFT que afecta a su uso en el análisis de vibraciones. Usted puede recordar que el FFT se realiza en un bloque de muestras llamado registro de tiempo. Una suposición realizada en el cálculo de FFT es que el registro de tiempo es continuo. Es decir, la señal justo antes del registro de tiempo capturado, y el bloque inmediatamente después de nuestro registro de tiempo son idénticos.

En este ejemplo, aunque estamos realizando el FFT en el bloque de datos con el fondo negro, el cálculo FFT “supone” que los datos continúan sin fin antes y después de este bloque de datos, como se muestra con los datos con un fondo gris.

En este ejemplo es cierto que la onda sinusoidal de frecuencia única comienza y termina en amplitud cero. Cuatro ciclos completos viven dentro del registro de tiempo

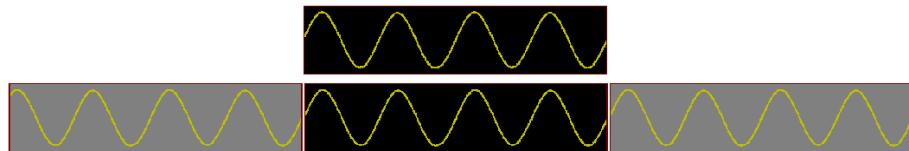


Figura 3-35 El proceso FFT asume que el bloque de datos va a cero al final. En este caso lo hace.

Si estamos analizando una onda sinusoidal pura, es decir, una sola frecuencia, y hay un número entero de ciclos en el registro de tiempo, entonces esta suposición es correcta.

Sin embargo, no es real pensar que el registro comienza y termina en cero. Comúnmente son similares a la Figura 3-36.

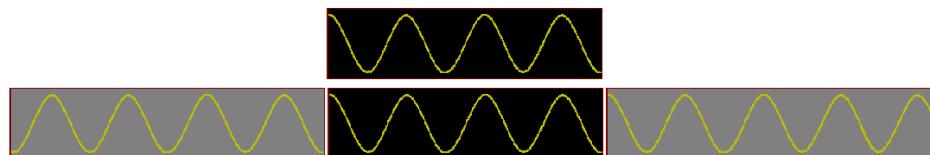


Figura 3-36 La Ventana de tiempo no comienza ni termina en cero.

Cuando se realiza el cálculo FFT, la señal es discontinua. Parece tener un aumento de paso en el nivel y se ve similar a un impacto en el cálculo FFT. Genera un pico que se extiende en una amplia banda de frecuencia similar a un impacto.

Recuerde que un impacto genera energía en un amplio rango de frecuencias. Eso no es lo que queremos ver como resultado de esto.

Los datos reales en la Figura 3-37 demuestran que el inicio y final de cada muestra no son de amplitud cero.

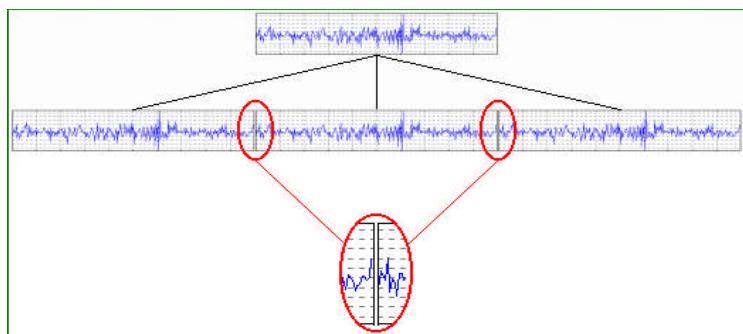


Figura 3-37 Ejemplo de datos reales donde el final del bloque de muestras no termina en amplitud cero.

Este fenómeno se llama **Fuga**. El resultado es una ampliación de los picos dentro del espectro.

Para evitar este problema, la forma del registro de tiempo se cambia realmente para que no haya datos al principio o al final del registro. Los extremos se empujan a amplitud cero. Esto se

conoce como **Ventanas** de datos. La ventana tiene un efecto mínimo en el contenido de frecuencia, pero afecta a la forma de los picos espectrales y los niveles de amplitud.

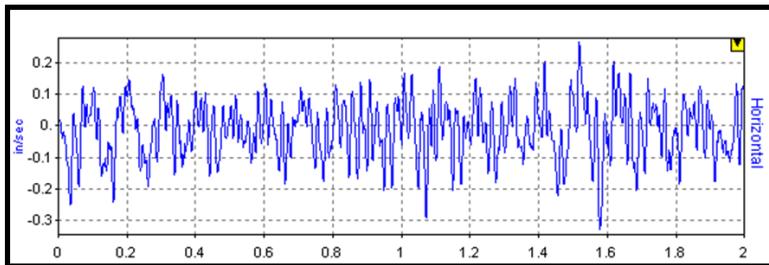


Figura 3-38 Estos son los datos crudos antes de aplicar ventanas.

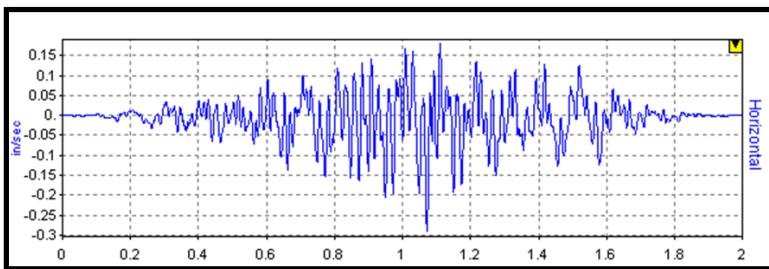


Figura 3-39 Esta es la misma señal pero aplicando la Ventana Hanning. Ambos extremos tienen amplitud cero  
En la Figura 3-39 está claro que cuando se aplica la ventana, no hay un cambio repentino en la amplitud de entrada o salida del bloque, por lo que no hay fuga.

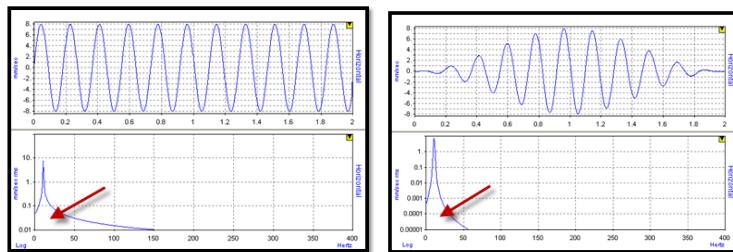


Figura 3-40 Menor cantidad de fuga al aplicar ventana

Hay una serie de funciones de ventana para elegir, cada una con una forma diferente, y cada una con un efecto diferente en el espectro resultante. La ventana “Hanning” se utiliza más comúnmente en el análisis de vibraciones de la maquinaria giratoria. Produce la mejor precisión de frecuencia, aunque afecta a la amplitud.

### ***El tipo de ventana afecta a la resolución de frecuencia***

La ventana de Hanning dará como resultado una amplitud correcta a cuando la frecuencia se corresponde exactamente con una línea de espectro. Si tenemos un espectro de líneas 800 con un  $F_{\max}$  de 800 Hz habrá bins o líneas separadas por 1Hz. (800 Hz / 800 líneas a 1Hz) y habrá un bin a 30 Hz. Si tratamos de medir una frecuencia de 30 Hz con una amplitud de “1” caería directamente en ese bin y la amplitud se leería correctamente como “1”.

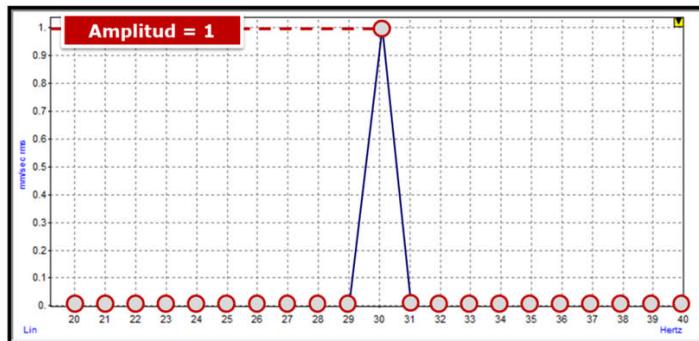


Figura 3-41 Frecuencia exactamente en la celda (bin)

¿Qué pasa si la vibración estaba a 30.5 Hz o directamente entre dos líneas? Si estamos utilizando una ventana de Hanning obtendremos picos a 30 y 31Hz, cada uno con una amplitud de 0.85, lo que significa que nuestro error de amplitud máxima con la ventana de Hanning es del 15%

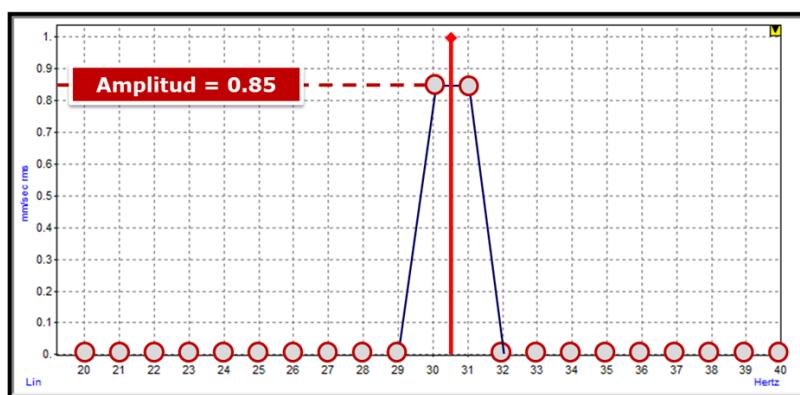


Figura 3-42 Error en amplitud del 15% de la real

La ventana de Hanning mejora nuestra precisión de amplitud, pero reduce la precisión de la frecuencia en un factor de 15. El 15 se llama el “factor de ventana” y debemos tenerlo en cuenta al considerar la resolución del espectro y nuestra capacidad para separar las frecuencias que están juntas.

**Ancho de banda = Resolucion x factor ventana**

$$\frac{F_{\max}}{LOR} \times FV$$

Ahora, en lugar de hablar de resolución (R) nos referimos al “ancho de banda”, que es R veces el factor de ventana.

Si  $F_{\max}$  es 1600 Hz y el LOR es 800 líneas, entonces la fórmula para determinar la resolución es  $1600 / 800 = 2$ . Ahora multiplique eso por 15 para obtener el ancho de banda de 3 Hz. Para separar dos picos en el espectro y verlos como picos discretos, necesitan ser más de 2 veces el ancho de banda separado entre sí.

Otros tipos de ventana incluyen:

- Ventana superior plana: tiene una mejor precisión de amplitud, pero la precisión de frecuencia es deficiente.
- Ventana Hanning - similar a la ventana de Hanning, excepto que los extremos no van a amplitud cero.
- Rectangular, Uniforme o Sin ventana: rectangular y uniforme son lo mismo que no tener ninguna ventana. Se pueden utilizar para pruebas de impacto para el análisis modal. A veces se utilizan para poner a cero los datos posteriores al disparador (trigger).

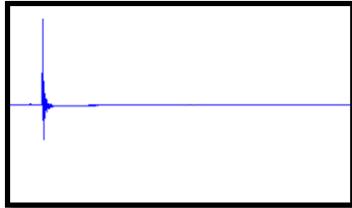


Figura 343 Ventana rectangular

- Ventana exponencial - Una función de ventana especial para minimizar las fugas en estructuras ligeramente amortiguadas que se utiliza en las pruebas de impacto. En una estructura ligeramente amortiguada, las oscilaciones no pueden morir dentro del bloque de datos de tiempo muestreado, T, lo que resulta en un error de fuga. Una ventana exponencial añade amortiguación a la señal de tiempo para forzarla a morir dentro del tiempo T, minimizando así las fugas. La amortiguación añadida se elimina matemáticamente después de procesar la señal.

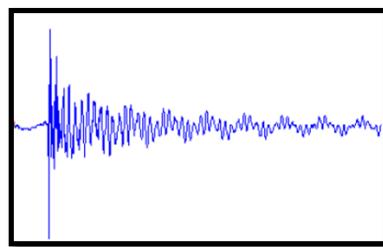


Figura 3-44 Ventana exponencial

La mayoría de los analistas utilizan solo la ventana de Hanning para mediciones rutinarias.

### ***Importancia de la resolución***

Al decidir sobre los parámetros de recopilación de datos para cada máquina, debe mirar la máquina, determinar las tasas de rotación de los componentes importantes y decidir cuáles serán las frecuencias de interés más bajas y altas. Usted debe recordar que también necesita analizar armónicos de frecuencias clave, que dictará la frecuencia más alta de interés - una frecuencia de engranajes o paso de barra del rotor, por ejemplo.

Muchos analistas de vibración menos experimentados simplemente se pegan con un rango de frecuencia, por ejemplo 1000 Hz, casi independiente de la máquina que se está analizando. Esto puede conducir a una resolución deficiente al probar máquinas de baja velocidad, y frecuencias clave perdidas en máquinas de mayor velocidad.

Muchos profesionales recomendarían un rango de frecuencia de 50 órdenes de velocidad de funcionamiento para la mayoría de las máquinas "normales". Por ejemplo, si la máquina funcionara a 1750 CPM (30 Hz), el rango de frecuencia sería 1500 Hz. Un rango de frecuencia de 50 órdenes le daría una serie de armónicos de las frecuencias de rodamientos y frecuencias de paso de álabes/paletas, y también puede darle un segundo armónico de una frecuencia de engranajes.

Sin embargo, si también utiliza las 800 líneas de resolución estándar (y por lo tanto 2048 muestras en la forma de onda de tiempo), habría  $15 * 1500 / 800 = 2.81\text{Hz}$  (o 168.75 CPM) entre líneas en el espectro (suponiendo que una ventana de Hanning), es decir, el ancho de banda sería de 2.81Hz. Esto hace que la determinación exacta de la frecuencia sea un poco difícil. En una máquina accionada por correa, o una máquina con sospechas de fallas eléctricas, y en otras situaciones donde hay varios picos en frecuencias cercanas, es posible que necesite una mayor resolución.

A veces dos mediciones son mejores que una. Es necesario tener una resolución más alta en las primeras diez órdenes de rotación donde se encuentran muchas de las frecuencias clave: 1X, 2X, soltura (1X-10X), remolino/látigo de aceite (sub 1X), frecuencias fundamentales de rodamientos (sub 1X y 2.5X-8X) y paso de paletas/álabes (4X-10X). Y luego otra medida de decir

50 a 100 órdenes de tasa de rotación. Esta segunda medición sería muy rápida debido a la alta frecuencia, y añadiría información valiosa.

Otro enfoque es colectar una sola medición de mayor frecuencia y resolución más alta de la máquina. Se realizaría en cajas de engranajes u otros componentes que contienen elementos giratorios de alta velocidad. En lugar de la medición normal de 800 líneas, puede utilizar 1600 líneas o superiores.

## Puntos clave

- Los estudiantes deben entender el propósito de usar ventanas
  - La ventana de Hanning resuelve el problema de fugas
  - Cada ventana proporciona un sacrificio en frecuencia vs precisión de amplitud
- El factor de ventana (WF) debe tenerse en cuenta al calcular la resolución del gráfico (R)
  - Ancho de banda:  $R \times WF$
- Para separar dos picos en un espectro
  - $SF > 2 \times F_{max} / LOR \times WF$
- Resumen de las ventanas
  - Plana
    - Buena amplitud pero pobre en frecuencia
    - Se utiliza para calibrar sensores
  - Rectangular
    - Buena frecuencia – utilizada para pruebas de impacto y martillo
  - Exponencial
    - Se utiliza para el canal de respuesta en la prueba de respuesta de fuerza
    - Amortigua la vibración antes del bloque de tiempo
  - Hanning / Hamming
    - Se utiliza para pruebas de ruta en maquinaria rotativa
    - Buena relación entre freq. y precisión de amplitud
    - Reduce las fugas

## Promedio

En un mundo ideal, el recopilador de datos colectaría un único registro de tiempo libre de ruido de una señal de vibración que nunca cambia, luego produciría el FFT y lo almacenaría. Pero la vibración está cambiando constantemente y hay ruido en la señal. Los cambios se producen a medida que los elementos giratorios pasan por los ciclos y hay ruido aleatorio desde el interior y el exterior de la máquina.

Hay una manera de minimizar los efectos del ruido y mantener más de los cambios debido a los ciclos dentro de la máquina. El proceso utilizado para corregir esto se llama **Promedio lineal**. Simplemente calcula el valor promedio de cada línea del espectro. Este proceso ayuda a mantener la repetibilidad para que dos mediciones tomadas 5 minutos de diferencia deben ser iguales.

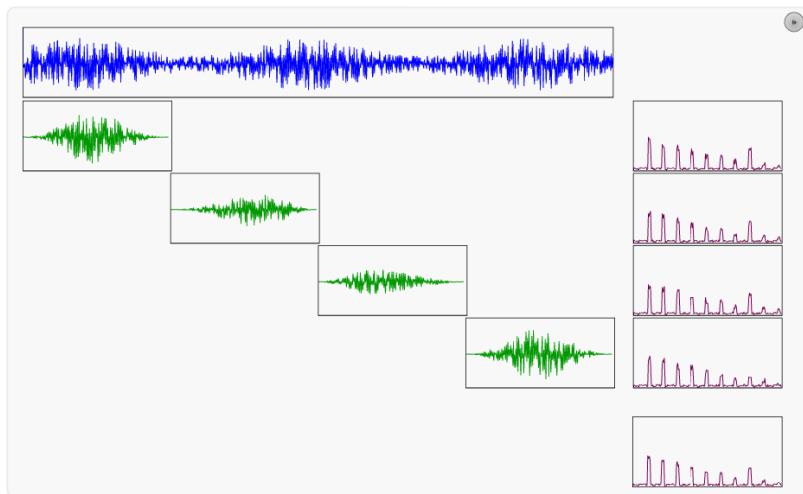


Figura 3-45 Promediado lineal con cuatro muestras

**Promedio lineal** colecta un registro de tiempo, produce el FFT y mantiene el FFT o espectro. El segundo bloque de tiempo se colecta inmediatamente después del primero y produce el FFT y lo mantiene. Esto se repite para cada promedio (generalmente 4). Los espectros se promedian para producir un espectro promediado. Se almacena y el resto se quita de la memoria.

$$A_3 = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

El promedio de RMS es similar al promedio lineal, sin embargo, cada valor es cuadrado, agregado al siguiente valor, dividido por el número de promedios y luego se toma la raíz cuadrada.

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

3-46 Promedio RMS

La mayoría de los colectores de datos utilizan un promedio lineal o RMS para las pruebas de ruta normales de maquinaria rotativa. Solo recuerde que el promedio reduce el ruido pero no lo elimina, no lo está filtrando.

### ¿Cuántos promedios usar?

El tiempo necesario para recopilar todos los datos debe ser lo suficientemente largo como para que el eje gire al menos unas cuantas veces. Si hay cargas de choque, se deben utilizar más promedios. Estamos tratando de promediar juntas todas las fuentes de vibración y ruido.

Hace algún tiempo, cuando espectros de 400 líneas eran comunes, se necesitaban muchos promedios para que la adquisición de datos “escuchara la máquina el tiempo suficiente”. Pero por cada aumento de resolución, de 400 a 800 a 1600 a 3200, duplicamos el tiempo que se tarda en adquirir los datos para un espectro. Por lo tanto, para cada aumento de cada paso en la resolución, podemos permitirnos reducir a la mitad el número de promedios. A medida que aumentamos la resolución, los registros de tiempo se alargan y, por lo tanto, el analizador captura la información importante de la máquina.

Así que hay algunos problemas que estamos tratando de equilibrar: Queremos que la cantidad total de tiempo para colectar la lectura sea suficiente para que el eje haga muchas revoluciones y para que tengamos suficientes promedios para reducir el ruido. Al mismo tiempo, queremos limitar la cantidad total de tiempo que se tarda en recopilar los datos porque el tiempo es dinero y no queremos pasar demasiado tiempo tomando datos.

El promedio de superposición nos ayuda a llegar a un buen compromiso.

### ***Promedio de superposición o traslape***

Con el fin de aumentar la velocidad de promediado, y para garantizar que no perdamos datos importantes, utilizamos el promedio de superposición. Si recuerda de nuestra discusión sobre ventanas, el inicio y el final del registro de tiempo se le aplica la ventana y se empujan a cero. Se podría decir que la información de vibración al principio y al final del registro se está desperdiciando. ¿Y si traslapamos las formas de onda? En lugar de usar un registro de tiempo completamente nuevo para cada promedio, podríamos usar parte del registro anterior.

En este ejemplo hemos utilizado 50%superposición - 50%del registro de tiempo anterior se utiliza para cada promedio. El recopilador de datos colectaría 1024 muestras, le aplicaría la ventana, crearía el FFT e iniciaría el promedio, luego colectaría sólo 512 muestras, las anexaría a las últimas 512 muestras del registro de tiempo anterior, aplicaría la ventana, produciría el FFT y lo agregaría a los promedios.

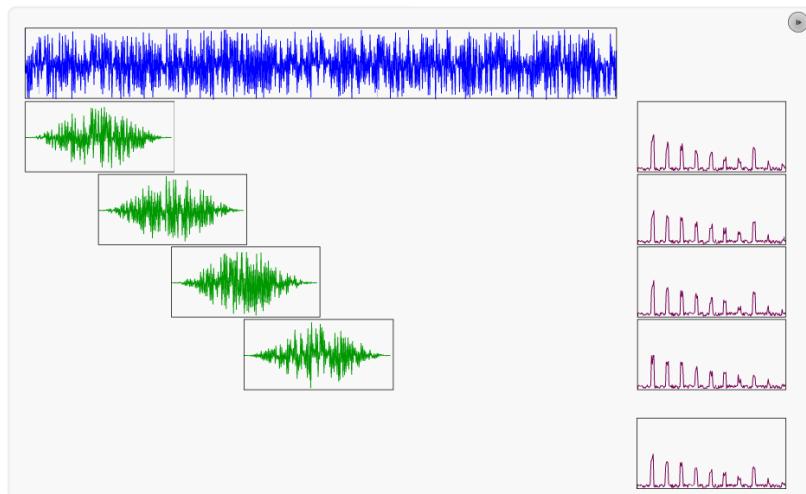


Figura 3-47

El 67% o cerca de él, es una buena opción de %de superposición al realizar el monitoreo normal de ruta.

Cuando la medición llama para almacenar la forma de onda, la mayoría de los analizadores almacenan el primer o último registro de tiempo sin ninguna ventana aplicada. De esta manera el analista puede ver el bloque de tiempo real que produjo el espectro. Algunos fabricantes recopilan y almacenan una forma de onda separada después de que los datos espectrales se han promediado y almacenado.

El tiempo guardado se muestra en este gráfico:

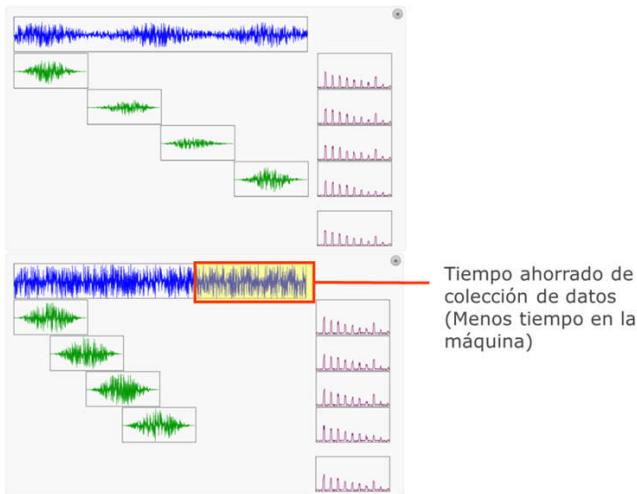


Figura 3-48

### Promedio de resta (negativo)

El promedio de resta es una función que resta el espectro de potencia del espectro de potencia después del promedio de suma (lineal). En este caso, permitimos que el analizador registre una serie de promedios mientras la máquina está en un modo, y luego recopilamos un segundo conjunto de promedios mientras la máquina está en un modo diferente. Durante la segunda etapa, el analizador está restando los datos del primer conjunto. El resultado es que vemos la diferencia entre los dos modos.

El promedio negativo es muy útil cuando se realizan pruebas de impacto en una máquina que está operando:

- La vibración se registra y se promedia mientras se golpea la máquina mientras está en funcionamiento.
- A continuación, se registra la vibración mientras la máquina no está siendo golpeada.
- Estos datos se restan del primer conjunto, dejando así sólo la respuesta al impacto – la resonancia.

### Promedio de retención de pico

El promedio de retención de pico se utiliza cuando queremos mantener las amplitudes más altas en cada línea del espectro. El promedio de retención de pico se utiliza al realizar pruebas de impacto y al realizar pruebas de arranque y paro (cuando otras técnicas más avanzadas no están disponibles).

$$\text{MAX}(x_1, x_2 \dots x_n)$$

El promedio de retención máxima también se podría utilizar en una situación en la que queremos ver los niveles máximos de vibración experimentados por una máquina en un período de 24 horas, por ejemplo, podría dejar el colector de datos funcionando toda la noche con el promedio de retención pico y cuando vuelva a comprobar sólo verá los valores más altos registrados en cada frecuencia durante ese período de tiempo.

## Puntos clave

- Los estudiantes deben entender el concepto de promediado y entender por qué se utiliza el promedio.
  - Promedio reduce pero no elimina el ruido
- Los estudiantes deben estar familiarizados con los diferentes tipos de promedio y sus aplicaciones
- Los estudiantes deben entender el proceso involucrado en la decisión de cuántos promedios colectar
- Los estudiantes deben sentirse cómodos con el concepto de promediado de superposición o traslape
  - Los estudiantes deben ser capaces de calcular el tiempo total para recopilar una lectura con y sin superposición.
  - Entienda que el promedio de superposición utiliza los datos desechados por la ventana de Hanning

## Activación (disparo o triggering)

Durante la recopilación de datos de ruta, el proceso de muestreo comienza cuando se pulsa el botón para iniciar la medición. Sin embargo, hay una serie de pruebas en las que es posible que desee que el sistema retrase la adquisición de datos hasta que se produzca un evento. Más comúnmente ese evento sería un pulso de tacómetro (durante el promedio síncrono de tiempo o mediciones de fase), o el impacto de un martillo durante las pruebas modales.

## Fase, seguimiento de orden y TSA

El recopilador de datos tendrá una entrada de disparador externo. Se puede indicar al recopilador de datos que espere hasta que se detecte el pulso de la señal del tacómetro (disparador) antes de que comience la adquisición.

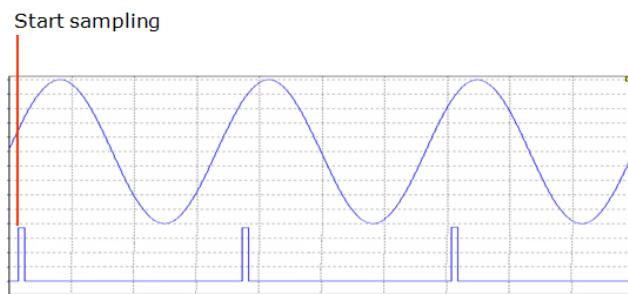


Figura 3-49

Los siguientes son algunos usos comunes para usar disparador:

- Fase a un canal:
  - Requiere la señal externa.
  - El recopilador de datos mide el atraso entre el tacómetro y el punto alto
- Promedio sincrónico de tiempo:
  - La captura de forma de onda se sincroniza con el pulso del tacómetro.
- Seguimiento de órdenes:
  - La frecuencia de muestreo se controla mediante la frecuencia de pulso del tacómetro.

Estas aplicaciones se discuten con mayor profundidad más adelante en este capítulo.

### ***Disparador impulsado por datos***

En lugar de utilizar un tacómetro, los propios datos pueden desencadenar la adquisición de datos. En este caso tenemos el impacto de un golpe de martillo durante una prueba de análisis modal.

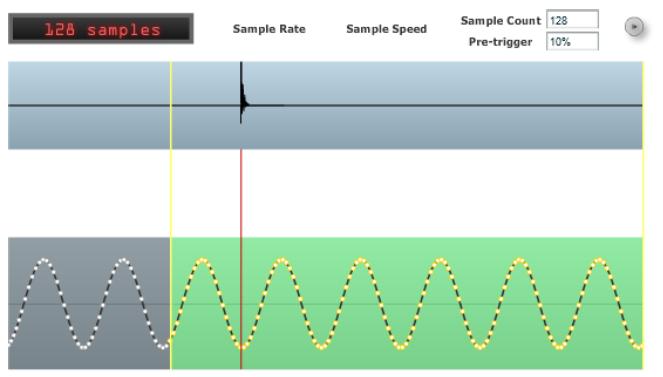


Figura 3-50

### ***Retrasos previos y posteriores al disparo***

Es posible indicar al recopilador de datos que almacena en búfer los datos para que puedan comenzar el muestreo antes de que llegue el disparador. En este ejemplo hemos adquirido datos que entraron antes del impacto. Esto es pre-disparador. Normalmente se define como un porcentaje del registro de tiempo.

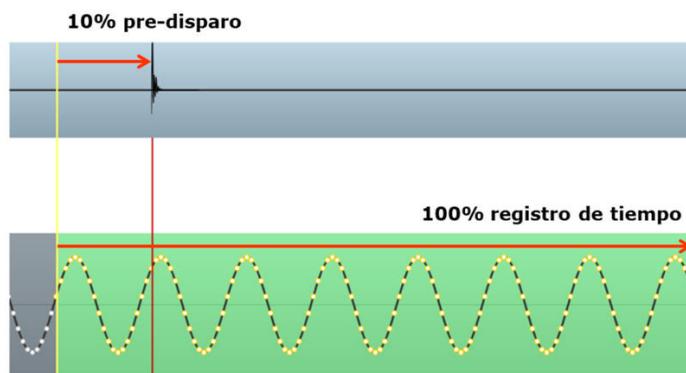


Figura 3-51

Si se utiliza la activación, debe ser sensible a la ganancia de entrada. Normalmente, un recopilador de datos establecerá su ganancia cuando comience a grabar la señal de vibración – esto introducirá un retraso. Al activar no podemos permitirnos ese retraso. Lo mejor es establecer la ganancia antes de tiempo.

## Promedio síncrono de tiempo (TSA)

Cuando un recopilador de datos comienza una medición, comienza a recolectar en un momento “arbitrario”. Pulsa el botón para iniciar una prueba, el recopilador de datos se prepara (establece la configuración de medición correcta) y luego comienza el muestreo. A continuación, continúa muestreando el tiempo que sea necesario; sobre la base de las líneas de resolución, el número de promedios y el porcentaje de superposición.

Anteriormente discutimos el promedio lineal de los espectros y observamos que el promedio lineal no elimina el ruido, sólo lo reduce. También mencionamos que el promedio lineal está promediando los espectros juntos, al igual que todos los métodos de promedio discutidos hasta ahora. ¿Qué pasa si promediamos juntas las formas de onda de tiempo en su lugar?

Lo primero que notarás si usted intenta promediar las formas de onda de tiempo juntas es que cada bloque de tiempo comienza cuando comienza y termina cuando se queda sin tiempo ( $T$ ). Si añadimos las formas de onda juntas, todas estarían fuera de fase y la suma de las formas de onda no tendría sentido. Si en su lugar activamos la medición con un tacómetro u otro dispositivo, las formas de onda de tiempo se sincronizarán con el pulso tacómetro o con la velocidad del eje.

Si hiciéramos promedios de estos bloques de tiempo (Figura 3-52), los datos serían promediados (desechados) – nada está sincronizado.

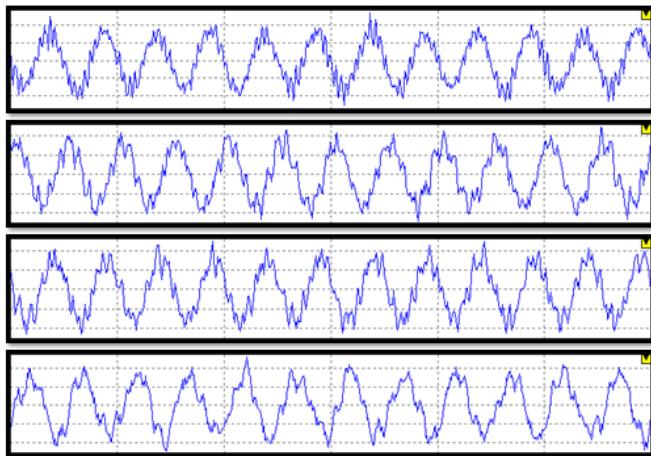


Figura 3-52

Si usamos una señal de disparo para sincronizar el principio de los registros de tiempo, los datos se verán de la siguiente manera:

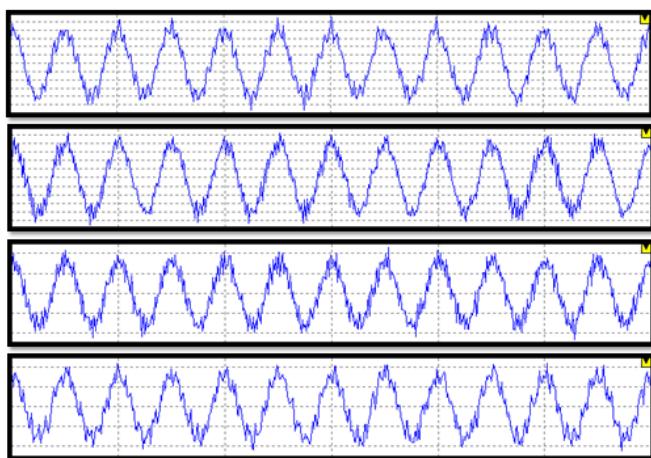


Figura 3-53

TSA es especialmente útil en el monitoreo de cajas de engranajes complejas porque podemos sincronizar la lectura a un eje en particular y esencialmente filtrar toda la vibración relacionada con los otros ejes. Esto nos permite enfocarnos en un engranaje a la vez.

Para sincronizar con ejes internos que no se pueden medir directamente con un tacómetro, puede utilizar un sintetizador de relación de seguimiento o un método digital para multiplicar la señal de tacómetro en el eje, se puede dividir por la relación de velocidad del eje que desea medir. De esta manera se puede sincronizar con cualquier eje.

¿Qué cree que pasaría con las frecuencias de rodamiento o el pico  $2xLF$  en un motor? Debido a que no son sincrónicos, ¡se filtrarán por completo de los datos!

TSA requiere un gran número de promedios, probablemente más de 100, para promediar toda la vibración no sincrónica. Esto y la necesidad de la señal de activación/sincronización (la señal del tacómetro) significa que este método no se utiliza a menudo para el monitoreo de ruta, sino más bien para pruebas especiales. Dicho esto, es una técnica poderosa y en ciertas situaciones (como el análisis de la caja de engranajes), el esfuerzo adicional pagará dividendos.

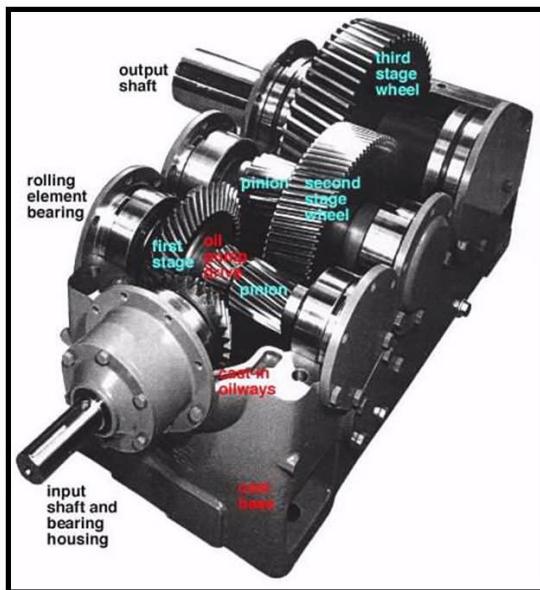


Figura 3-54

## Autocorrelación

<sup>1</sup>La función de autocorrelación se utiliza para revelar periodicidades en los datos de forma de onda. El FFT también se utiliza para revelar periodicidades, pero la autocorrelación mantiene los datos en formato de forma de onda de tiempo. La autocorrelación es eficaz para revelar señales con ciclos de trabajo bajos. La función de autocorrelación se puede considerar “una medida de la similitud que una señal tiene con una versión de tiempo desplazado de sí misma”

<sup>1</sup>Noise and vibration analysis – Brandt – página 71

<sup>2</sup>La forma de onda correlacionada automáticamente contiene solo las señales correlacionadas. Se eliminan los datos no correlacionados (aleatorios). Los datos periódicos sincrónicos y no sincrónicos sobreviven, a diferencia de los datos promediados sincrónicos de tiempo. Por lo tanto, es útil para el análisis de rodamientos de rodamientos de elementos y otras aplicaciones donde los patrones periódicos son difíciles de ver en la forma de onda. Es muy útil para identificar fallas a una velocidad periódica baja en relación con el ancho de banda de análisis. Por ejemplo, fallas en la jaula (canasta) de un rodamiento. Las señales con tasas periódicas más altas y ciclos de trabajo más altos se revelarán a través del FFT.

## Seguimiento de órdenes

Existen numerosas aplicaciones en las que la velocidad de la máquina puede variar durante la prueba de vibración, como las pruebas de arranque y paro, y las máquinas de velocidad variable: industria minera (draglines, etc.), ascensores, vehículos (coches, camiones, trenes, etc.), grúas, etc. A menos que se tomen precauciones, los espectros de vibración serán “manchados”. Los picos serán “amplios” porque la frecuencia cambió durante la prueba.

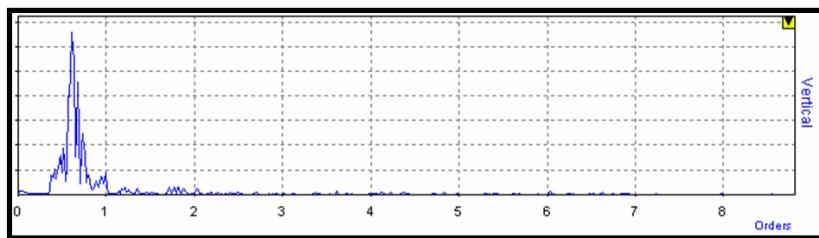


Figura 3-55

Cuando se establece el  $F_{max}$  en el recopilador de datos, determina la rapidez con la que debe muestrear la señal analógica entrante de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

El tiempo entre cada muestra es constante.

<sup>2</sup> Autocorrelation as an analysis tool – James C. Robinson

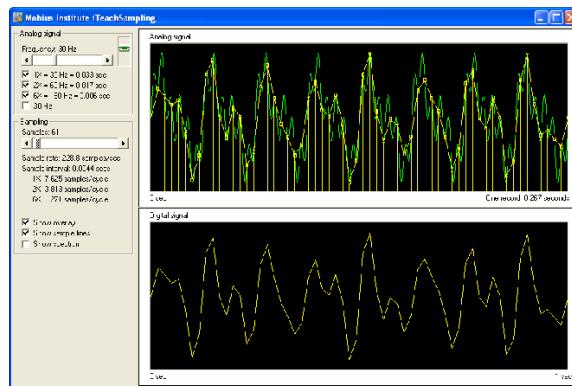


Figura 3-56

### **Ejemplo: Dragline en la industria minera**

Una línea de arrastre representa un desafío para un analista de vibración:

- La carga/velocidad varía drásticamente.
- Máquinas muy importantes, por lo que el análisis de vibraciones es importante.
- Configuración de prueba repetible especial para permitir la monitorización de vibraciones.
- La velocidad varía durante la prueba.



Figura 3-57

A continuación se muestra un ejemplo de datos de una caja de engranajes. La velocidad y la carga cambiaron durante la prueba.

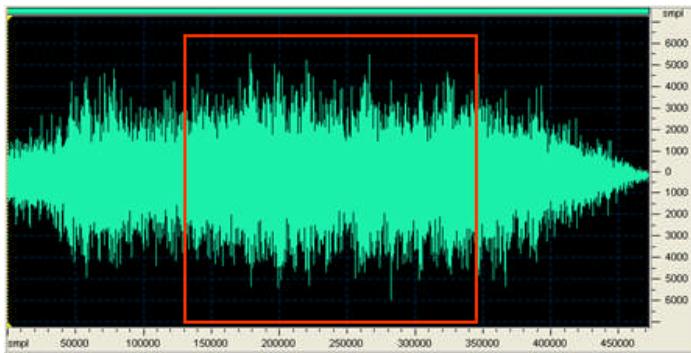


Figura 3-58

Las turbinas eólicas son otro caso en el que la velocidad de la máquina varía durante la prueba. A medida que cada aspa pasa a través del ojo del viento, se acelerará y ralentizará lo suficiente como para manchar los datos. No sólo eso, los datos en sí son bastante complejos; estamos analizando datos de una gran cantidad de rodamientos y engranajes y necesitamos ser capaces de separar los picos, armónicos y bandas laterales.

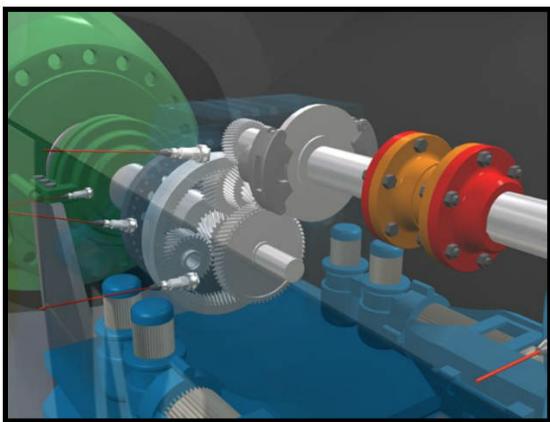


Figura 3-59

Hay una serie de posibles soluciones a este problema.

**Solución 1**

- E1** Escalonar el proceso de promediado
- o Realice la prueba una vez (opere la máquina) y recopile tantos promedios como sea posible
    - F1** Sólo puede haber tiempo para colectar 1 o 2 promedios con la velocidad y la carga constantes
  - o Repita la prueba y colecte promedios adicionales
  - o Puede requerir dos o tres pruebas antes de tener datos suficientes

**Solución 2**

- E1** Normalizar los espectros:
- o Mida la velocidad a medida que se colecta cada espectro
  - o Ajuste cada espectro para que todos parezcan probados a la misma velocidad
    - F1** Primera medición 25 Hz
    - F1** Segundo espectro 2% más rápido
      - E1** Ajuste todos los picos en un 2%
    - F1** Tercer espectro 15% más lento
      - E1** Ajuste todos los picos en un 15%
  - o Todavía habrá manchas en cada espectro
  - o Las resonancias (y la vibración externa) siguen siendo un problema

**Solución 3**

- E1** Variar la frecuencia de muestreo de acuerdo con la velocidad instantánea de la máquina.
- E1** Utilice una señal de tacómetro para indicar la velocidad de la máquina.
- E1** Recopile datos de vibración simultáneamente.
- E1** Tres alternativas:
- o Utilice un sintetizador de relación de seguimiento para generar pulsos utilizados para desencadenar la recolección de cada muestra.
  - o Utilice el software para realizar el post-proceso de los datos.
  - o Utilice un codificador de eje.

**Frecuencia de muestreo variable**

Basado en nuestra ecuación familiar:

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

- E1** Si la velocidad era de 25 Hz,  $F_{max}$  era de 1000 Hz y LOR=800
- E1**  $T = 800 / 1000 = 0.8$  segundos  $N = 2048$
- E1**  $T_s = 0.8 / 2048 = 0.00039$  segundos entre muestras
- E1** Velocidad = 25 Hz Período = 0.04 segundos

Por lo tanto, aprox. 100 muestras por ciclo ( $0.04/0.00039$ )

A continuación, se muestra un ejemplo de frecuencia de muestreo constante y una máquina de velocidad constante (la frecuencia no cambia):

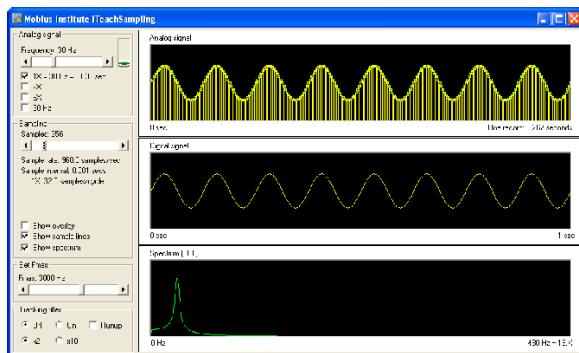


Figura 3-60

Ahora la velocidad está cambiando, pero estamos de nuevo usando una frecuencia de muestreo constante. El espectro está manchado.

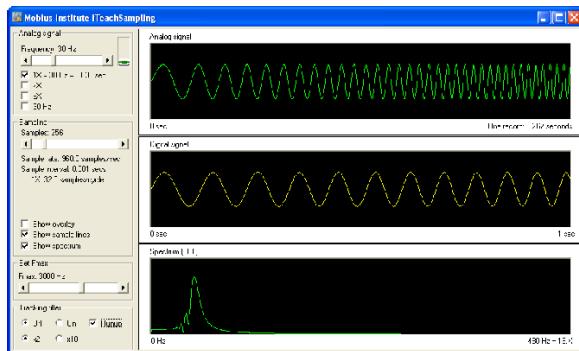


Figura 3-61

Al variar la frecuencia de muestreo, la forma de onda digital “parece” como si la máquina no variara en velocidad. El eje X ya no es frecuencia – está en órdenes.

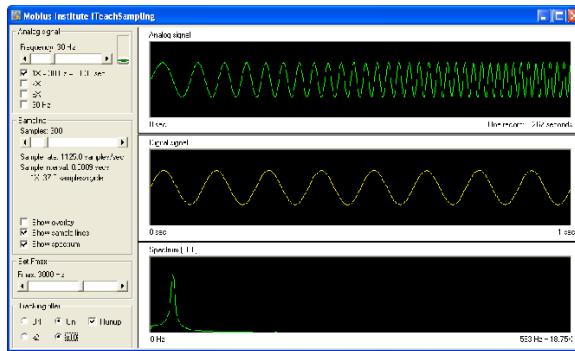


Figura 3-62

Las fuentes de vibración que varían junto con la velocidad de funcionamiento (1X, 2X, frecuencias de rodamiento, etc.) permanecerán en una ubicación fija en el eje X. Otras fuentes de vibración se moverán a lo largo del eje X, por ejemplo, frecuencias resonantes, frecuencias eléctricas, etc. Puede ver la diferencia en los dos mapas espectrales a continuación.

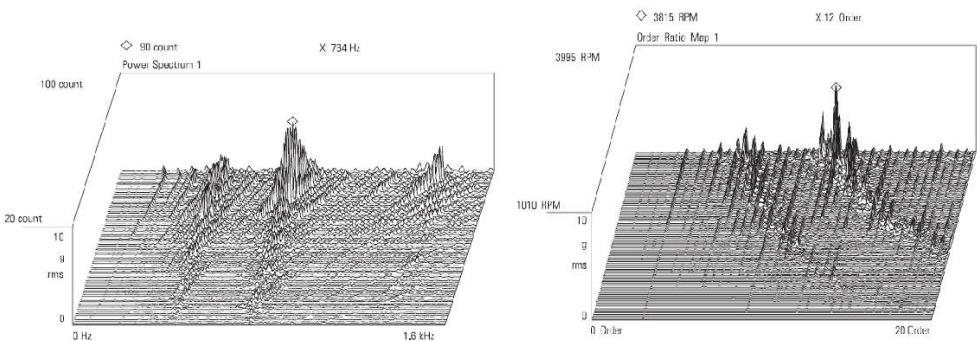


Figura 3-63 – Izquierda; mapa de espectro sin seguimiento de órdenes. Derecha; mismos datos con seguimiento de órdenes

### **Sintetizador de relación de seguimiento**

Antes mostramos que, si la velocidad es de 25 Hz,  $F_{\text{max}} = 1000$  Hz, y usamos 800 líneas, entonces tenemos 100 muestras por ciclo. Pero la señal de tacómetro es de un pulso por ciclo.

A medida que la velocidad varía, nos gustaría mantener aproximadamente 100 muestras por segundo.

Un sintetizador de relación de seguimiento tomará el tacómetro como entrada y producirá un flujo de pulsos a una frecuencia mucho más alta, por ejemplo 100 pulsos por ciclo.

El recopilador de datos o analizador de espectro solo recopila una muestra cuando recibe un pulso. Esto se llama comúnmente “análisis de orden”. El sintetizador de relación de

seguimiento es un dispositivo costoso y necesita un recopilador de datos o analizador que admite ese tipo de medición.

Los sintetizadores de relación de seguimiento también pueden producir una salida que está en una proporción diferente de velocidad de funcionamiento. En las pruebas de la caja de engranajes, el TRS puede producir una corriente de pulsos a la velocidad del eje intermedio, por ejemplo.



Figura 3-64

Los sintetizadores de relación de seguimiento a menudo utilizan un “bucle de fase bloqueada” y filtros. Tienen que rastrear la velocidad  $\Delta\theta$  ya que la máquina varía en velocidad. El mayor problema es que fallan cuando la velocidad varía rápidamente.

- F0 Máquina subiendo a la velocidad de operación o durante el paro.
- F1 Dragline balanceando la cubeta.

La siguiente es la señal del tacómetro de una máquina que varía en velocidad.



Figura 3-65

### Codificador de eje

Un codificador de eje es un dispositivo que genera un gran número de pulsos por revolución. Puede ser un dispositivo físico, como un engranaje con una sonda de desplazamiento que monitorea los dientes. Y puede ser un dispositivo electrónico que gira con el eje.

Por ejemplo, si el dispositivo generara 360 pulsos por revolución, tendríamos un pulso por grado de rotación (Los datos están en el “dominio angular”).



Figura 3-66

La señal se utiliza para controlar la frecuencia de muestreo del analizador/colector de datos.

Nota: a menos que se realice una medición separada de la velocidad durante la prueba, los datos no tienen referencia de velocidad (no es posible relacionar un pico con una frecuencia en Hz o CPM).

### Enfoque digital

Los sistemas modernos tienen un enfoque diferente:

- Muestrear la(s) señal(es) de vibración y la señal del tacómetro en una muy alta tasa.
- Moverse a través de los datos ciclo por ciclo:
  - o Examine la señal del tacómetro para determinar la velocidad de la máquina.
  - o Digitalmente “remuestrear” los datos de vibración en consecuencia.

Los sistemas modernos pueden hacerlo en tiempo real. Muchos sistemas realizan el análisis después de que se han registrado los datos.

El espectro se muestra en órdenes (por ejemplo, 0 – 10 x velocidad de marcha). Como se mencionó anteriormente, las frecuencias fijas se “moverán” a través del espectro:

- F0** Frecuencia de dos veces la frecuencia de líneas
- F0** Resonancias
- F0** Vibración externa

Es típico ver estos datos como un trazado de cascada o un mapa espectral.

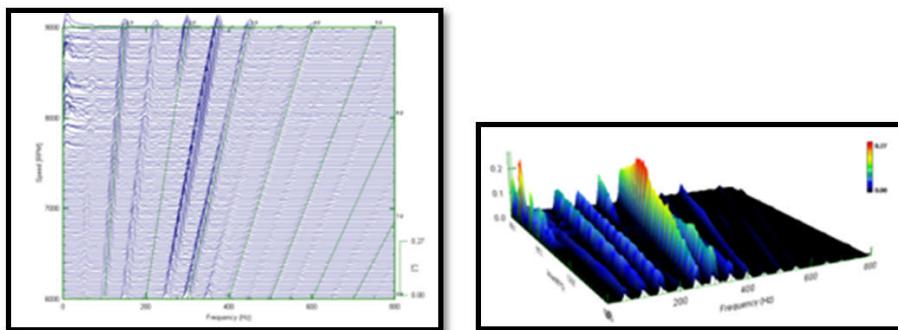


Figura 3-67

Las gráficas de mapa espectral y cascada muestran cómo cambió la vibración con el tiempo o la velocidad. Eliminan el problema de “manchas” relacionado con las fuentes de frecuencia fija de vibración.

## Puntos clave

- F0** Los estudiantes deben ser conscientes de las técnicas avanzadas de procesamiento de señales y sus aplicaciones, incluyendo:
  - o Activación (disparo o triggering)
  - o Promedio síncrono de tiempo (TSA)
    - F0** Uso de sintetizadores de relación de seguimiento
  - o Autocorrelación
  - o Seguimiento de órdenes
- F0** Los estudiantes no sólo deben entender cuándo usar estas técnicas, sino que deben saber cómo funcionan y entender cualquier problema asociado con ellas.