

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes

Autor: María del Rosario Prieto García

Tutor: Juana María Mayo Núñez

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes

Autor:

María del Rosario Prieto García

Tutor:

Juana María Mayo Núñez

Catedrático de Universidad

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes

Autor: María del Rosario Prieto García

Tutor: Juana María Mayo Núñez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este proyecto supone el fin de una etapa de mi vida y el comienzo de otra nueva. Comencé hace cuatro años sin saber si esta carrera sería lo mío, y hoy por hoy sé que no me equivoqué al elegir. A lo largo de todos estos años de aprendizaje he tenido mucha gente a mi lado que me ha apoyado y animado en cada momento. En especial mi familia, que siempre me ha brindado su ayuda y han hecho que momentos amargos lo sean menos. Aprendí a leer antes de tiempo gracias a mis padres, y es que gracias a ellos he llegado hasta aquí, pues ellos me han enseñado a que todo se consigue con constancia y trabajo duro. También he tenido la oportunidad de aprender de buenos profesores y compañeros que han hecho que este camino haya sido más fácil. Es por ello que tengo que agradecerles a todas esas personas todo lo que me han aportado.

Resumen

En este trabajo se va a presentar un método comúnmente utilizado para el análisis de máquinas giratorias, análisis de órdenes. Esta técnica supone que la señal de ruido o vibración de una máquina giratoria consiste en un número de ondas sinusoidales dependientes de la velocidad de rotación del motor con amplitud y fase variables, y con una frecuencia que es un factor constante (el número de orden) por la RPM del motor. Por lo tanto, el orden uno corresponde a la frecuencia de rotación de la máquina, el orden dos es el primer armónico (dos veces la frecuencia del orden uno), etc. El análisis de las máquinas giratorias mediante seguimiento de órdenes se hace generalmente durante un run-up de la máquina, donde el RPM se incrementa desde un RPM bajo a un RPM alto, o durante un coast-down, donde la máquina está disminuyendo de un RPM alto a un RPM bajo. En cualquier caso, el análisis se hace de la misma manera dividiendo la señal en segmentos cortos de tiempo, y calculando una FFT de cada segmento. El mapa de los espectros frente a RPM, mapa RPM, se puede representar en un diagrama de cascada en 3D o en un mapa de intensidad de color en el que se pueden identificar los órdenes y las frecuencias de resonancia de la máquina. El análisis de órdenes es una técnica en la que se analizan señales no estacionarias. Por lo tanto, es importante comprender el concepto de la limitación del producto ancho de banda-tiempo para el análisis de frecuencias. Utilizando un ancho de banda particular de análisis, la resolución temporal está limitada de tal manera que los cambios en, por ejemplo, el nivel RMS frente a RPM, que son de interés en el seguimiento de órdenes, sólo pueden estimarse correctamente si son lo suficientemente lentos. Esto significa que es mejor utilizar velocidades de arranque relativamente lentas para obtener estimaciones fiables de los order tracks.

Del mapa RPM se pueden extraer los order tracks siendo el método fiable usar una ventana Hanning en los cálculos FFT y luego sumar cinco valores de frecuencia alrededor de un orden particular para obtener el nivel RMS. Esto reduce el efecto de las manchas, como se describe en la Sección 5.4. Para reducir aún más el efecto del manchado, la señal muestreada originalmente con frecuencia de muestreo fija puede remuestrearse en el dominio del ángulo, donde la señal se muestrea con un número fijo de muestras por revolución del motor. Esto produce una señal con "frecuencia" aparentemente constante.

Las técnicas paramétricas, como el ahora popular método de filtro Vold-Kalman, pueden ofrecer ventajas cuando los órdenes se cruzan en máquinas con dos o más partes giratorias independientes, o cuando las señales de tiempo de cada orden son de interés en aplicaciones de calidad de sonido. Otras técnicas paramétricas, como el método de Prony, no han demostrado ser confiables para la mayoría de las aplicaciones de maquinaria rotativa.

This paper contains a method commonly used for the analysis of rotating machines, “order analysis”. This technique involves that the noise or vibration signal of a rotating machine consists of a number of sinusoidal waves, depending on the speed of rotation of the motor with varying amplitude and phase and with a frequency which is a constant factor (the order number) by the engine RPM. Therefore, order one corresponds to the rotation frequency of the machine, order two is the first harmonic (twice the frequency of order one), etc. The analysis of rotating machines by order tracking is usually done during a run-up of the machine, where the RPM is increased from a low RPM to a high RPM, or during a coast-down, where the machine is decreasing by one High RPM to low RPM. In any case, the analysis is done in the same way by dividing the signal into short segments of time, and calculating an FFT of each segment. The map of the spectra versus RPM, RPM map, can be represented in a 3D cascade diagram or in a color intensity map in which the orders and the resonance frequencies of the machine can be identified. Command analysis is a technique in which non-stationary signals are analyzed. Therefore, it is important to understand the concept of the bandwidth-time product limitation for frequency analysis. Using a particular bandwidth analysis, the temporal resolution is limited such that the changes in, for example, the RMS level versus RPM, which are of interest in “order tracking”, can only be correctly estimated if they are sufficiently slow. This means that it is best to use relatively slow boot speeds to obtain reliable estimates of order tracks.

From the RPM map, you can extract the order tracks, being the reliable method to use a Hanning window in the FFT calculations and then add five frequency values around a particular order to obtain the RMS level. This reduces the effect of smearing, as described in Section 5.4. To further reduce the effect of spotting, the originally sampled signal, with fixed sampling frequency, can be resampled in the angle domain, where the signal is sampled with a fixed number of samples per motor revolution. This produces a seemingly constant "frequency" signal.

Parametric techniques, such as the now popular Vold-Kalman filter method, may offer advantages when orders are crossed on machines with two or more independent rotating parts, or when the time signals of each order are of interest in quality applications sound. Other parametric techniques, such as the Prony method, have not been proven to be reliable for most rotary machinery applications.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
2 Procesamiento Digital de la Señal	3
2.1. <i>Series de Fourier</i>	3
2.2. <i>Transformada de Fourier</i>	5
2.3. <i>Funciones muestreadas en el tiempo</i>	5
2.4. <i>Transformada de Fourier Discreta</i>	5
2.4.1 FFT para series de valores reales	6
2.4.2 Limitaciones del procesamiento FFT	7
3 Tipos de Señales	11
3.1. <i>Análisis de barrido</i>	11
3.1.1 Elección de los parámetros de análisis	11
3.1.2 Señales cíclicas	13
3.1.3 Variaciones espectrales debido a la velocidad de la máquina	14
3.2. <i>Análisis de Seguimiento de Órdenes</i>	17
4 Introducción al Fallo de Máquinas Rotativas	19
4.1 <i>Desequilibrio</i>	19
4.2 <i>Desalineamiento</i>	20
4.2.1 Desalineación angular	20
4.2.2 Desalineación paralela	20
4.2.3 Desalineación combinada	20
4.3 <i>Eje doblado</i>	21
4.4 <i>Resonancia</i>	21
4.5 <i>Falta de apriete en elementos de unión</i>	21
4.5.1 Tipo A	21
4.5.2 Tipo B	22
4.5.3 Tipo C	22
4.6 <i>Roce del rotor</i>	22
5 Principios de Análisis de Máquinas Rotativas	23
5.1 <i>Análisis tiempo-frecuencia</i>	23
5.2 <i>Señales de velocidad de rotación. Señal de tacómetro.</i>	25
5.3 <i>Mapas RPM</i>	25
5.3.1 Diagrama de cascada	28
5.3.2 Mapa de color	28
5.4 <i>Fenómeno de manchas ('Smearing')</i>	29

5.5	<i>Seguimiento de órdenes (Order tracking)</i>	30
6	Teoría del Análisis de órdenes	33
6.1	<i>Relaciones fundamentales de los DSP para máquinas rotativas</i>	33
6.2	<i>Análisis de órdenes mediante muestreo fijo</i>	34
6.3	<i>Análisis de órdenes mediante muestreo síncrono</i>	35
6.4	<i>Métodos paramétricos</i>	36
7	Aplicación Teórica-Práctica	37
7.1	<i>Ejemplo 1.</i>	37
7.1.1	Código Matlab	37
7.1.2	Resultados	40
7.2	<i>Ejemplo 2.</i>	46
7.2.1	Código Matlab	47
7.2.2	Resultados	48
8	Conclusiones	55
9	Bibliografía	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. (a) Componente sinusoidal típico $\text{Acos}(2\pi ft + \phi)$. (b) Representación como suma de vectores contrarrotatorios.	3
Figura 2-2. Limitaciones del proceso FFT.	7
Figura 2-3. Picket Fence Effect.	8
Figura 3-1. Señal enventanada.	12
Figura 3-2. Técnica de análisis de señales cíclicas.	13
Figura 3-3. Representación frecuencia-tiempo del ciclo de un motor diesel.	14
Figura 3-4 . Mapa espectral tridimensional. Diagrama de cascada.	15
Figura 3-5 . Ejemplo de un diagrama de Campbell.	15
Figura 3-6. Mapa espectral con la velocidad del eje en el tercer eje, mostrando la separación entre armónicos de los componentes de frecuencia constantes.	16
Figura 3-7. Análisis espectral del run-donw de un pequeño motor eléctrico.	17
Figura 3-8 . (a) Análisis de un componente fundamental el cual es incrementado en frecuencia. Registro de datos resultante de un índice de muestreo uniforme, y su espectro el cual se extiende a lo largo de una banda de frecuencias correspondiente al cambio de frecuencia. (b) Señal de tiempo original. (c) Registro de datos resultante de un muestreo de 8 tiempos por ciclo fundamental y su espectro que se concentra en una línea de análisis.	18
Figura 4-1. Formas prácticas de desalineamiento de ejes.	20
Figura 5-1. Espectrogramas que ilustran la limitación del producto BT. (a) Se incrementa la frecuencia 4Hz aproximadamente. (b)Se incrementa la frecuencia 1Hz aproximadamente.	24
Figura 5-2. Tacómetro óptico.	25
Figura 5-3. Tacómetro magnético.	25
Figura 5-4. Principio de análisis de las máquinas rotativas.	27
Figura 5-5. Ejemplo de diagrama de cascada.	28
Figura 5-6. Ejemplo de mapa de color.	28
Figura 5-7 . Efecto de manchas.	29
Figura 5-8. Efecto de manchas con diferentes ventanas.	30
Figura 5-9. Ilustración del principio de los diagramas Order Tracks.	31
Figura 6-1. Parámetros básicos de un Procesador digital de señal.	33
Figura 6-2. Muestreo de la señal.	33
Figura 6-3. Fundamentos básicos del Muestreo fijo vs. Muestreo síncrono.	35
Figura 7-1. Superior, velocidad del motor medida en revoluciones por minuto.Inferior, seña de vibración en función del tiempo.	40
Figura 7-2. Mapa de color con resolución en frecuencia 15.625 Hz.	41
Figura 7-3. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 15.625 Hz.	42
Figura 7-4. Mapa de color con resolución en frecuencia 10 Hz.	43
Figura 7-5. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 10 Hz.	43

Figura 7-6. Mapa de órdenes con remuestreo síncrono.	44
Figura 7-7. Amplitud RMS media de cada orden.	45
Figura 7-8. Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking.	46
Figura 7-9. Superior, velocidad del motor medida en revoluciones por minuto. Inferior, señal de vibración en función del tiempo.	48
Figura 7-10. Mapa de color con resolución en frecuencia 3.906 Hz.	49
Figura 7-11. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 3.906 Hz.	49
Figura 7-12. Mapa de color con resolución en frecuencia 1 Hz.	50
Figura 7-13. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 1 Hz.	50
Figura 7-14. Mapa de órdenes con remuestreo síncrono.	51
Figura 7-15. Amplitud RMS media de cada orden.	52
Figura 7-16. Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking.	52
Figura 8-1. Modelo Fuente-Sistema de transferencia- Receptor de la vibración y ruido.	55
Figura 8-2. Comparación entre diferentes tipos de mantenimiento.	56

Notación

e	Número e
j	Número imaginario
\cos	Función coseno
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
\int_a^b	Integral definida entre a y b
\sum	Sumatorio
$\frac{dy}{dx}$	Derivada de y respecto de x
π	Número π

1 INTRODUCCIÓN

El análisis de vibraciones como herramienta para detectar problemas en máquinas rotativas, ha generado un gran impacto en la industria por sus beneficios económicos y su capacidad para diagnosticar en modos tempranos, un posible daño en los sistemas. Defectos como el desbalanceo o la desalineación del eje, son problemas fundamentales que ocasionan el deterioro de los demás elementos del sistema. Por tanto, la identificación temprana de este tipo de fallos, mejora el rendimiento del sistema y evita que se presenten futuros inconvenientes.

En el análisis de vibraciones en máquinas rotativas hay dos propiedades que son de particular interés. Como siempre, las resonancias estructurales (modos) son de interés porque amplifican las vibraciones. Pero además, en máquinas giratorias hay que prestar atención a las vibraciones provocadas directa o indirectamente por la propia rotación, ya que pueden volverse grandes sin ninguna amplificación de resonancia. Estas últimas vibraciones son causadas, por ejemplo, por desequilibrios, deformación de ejes o desalineación, defectos en los dientes de los engranajes, etc. Cada una de estas fuentes produce vibración en un factor particular multiplicado por la velocidad de rotación de la máquina. Las vibraciones dependientes de la velocidad de rotación en máquinas giratorias pueden, por supuesto, ocurrir a una frecuencia en la que la estructura tiene una resonancia, que a menudo puede causar niveles de vibración muy altos, que a veces acaba en desastre.

Se suele pensar en una máquina que funciona incorrectamente como aquella que está rota o no cumple con su tarea prevista. Pero una avería suele ser el resultado de un largo periodo de acumulación de daños. La mayor parte de las máquinas seguirán funcionando y realizando trabajos útiles incluso con un problema activo o en desarrollo. Sin embargo, las máquinas y los productos perdidos suponen un coste muy elevado como para esperar hasta que una máquina se rompa antes de pensar en mal funcionamiento.

La gestión preventiva de la maquinaria requiere que se detecten los problemas tan pronto como sea posible para programar el mantenimiento, hacer reparaciones o ajustar el proceso. Es imprescindible por motivos económicos prever tiempos de inactividad no planificados y reducción de la producción.

Se denomina orden a un factor proporcional la velocidad de rotación, donde la velocidad de rotación se denomina orden 1, dos veces la velocidad de rotación es orden 2, etc. Los órdenes no necesitan ser números enteros, podemos tener orden 2.5 o 3.938, etc. Los métodos para analizar vibraciones en máquinas giratorias a las que se están enfocando aquí, se basan principalmente en medir la cantidad de ruido o vibración debida a una frecuencia de orden o de resonancia. El número de orden de la vibración dominante se puede utilizar a menudo para deducir desde donde se origina la vibración. Si, por ejemplo, tenemos una caja de cambios con relación de transmisión 1: 2.3 y tenemos altos niveles de vibración en el orden 4.6, el problema está relacionado con algo que sucede dos veces por rotación del eje de salida.

La técnica empleada más a menudo para el análisis de las vibraciones y el sonido de las máquinas giratorias, es un tipo especial de análisis de frecuencia, usualmente llamado análisis de órdenes. Este análisis se basa en el seguimiento de los niveles de RMS de los tonos sinusoidales variables en el tiempo, resultantes de las fuerzas periódicas que actúan sobre la máquina. En este trabajo se estudiará cómo se lleva a cabo este análisis y se verá brevemente algunos problemas de vibración que se producen en las máquinas rotatorias. Los factores discriminantes para diferenciar todo tipo de fallas son la amplitud y la frecuencia de cada componente espectral.

El análisis de órdenes se utiliza predominantemente en las industrias automotriz y aeroespacial. Otras áreas en las que se utiliza comúnmente el análisis de maquinaria rotativa son, por ejemplo, las aplicaciones de monitoreo de vibraciones en la industria de procesos, y para equilibrar motores de turbina y muchas otras máquinas.

Desde el punto de vista de señales de vibración, el análisis tradicional se basa en el análisis de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia, siendo este último el más relevante, debido a la naturaleza de la señal misma, es decir, por ser la señal de vibración una suma de sinusoides con distintas frecuencias y amplitudes. Por ello antes de continuar con el análisis de vibraciones en máquinas rotativas, se va a estudiar cómo se realiza el procesamiento digital de la señal.

2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA SEÑAL

La base de la matemática del análisis en frecuencia es la Transformada de Fourier, la cual toma diferentes formas dependiendo del tipo de señal analizada. Todas estas formas tienen en común que se asume que la señal está compuesta por un número (quizás infinito) de componentes sinusoidales a distintas frecuencias, cada una teniendo una amplitud y fase inicial.

Un componente sinusoidal típico con amplitud A , fase inicial ϕ , y frecuencia f se representa en la siguiente Figura 2-1. Sin embargo esta representación tiene la desventaja de que se representa el tiempo y la fase en el eje X, pudiendo dar fácilmente a confusión. Es por ello que se hace necesario recurrir a otro tipo de representaciones más clara de entender.

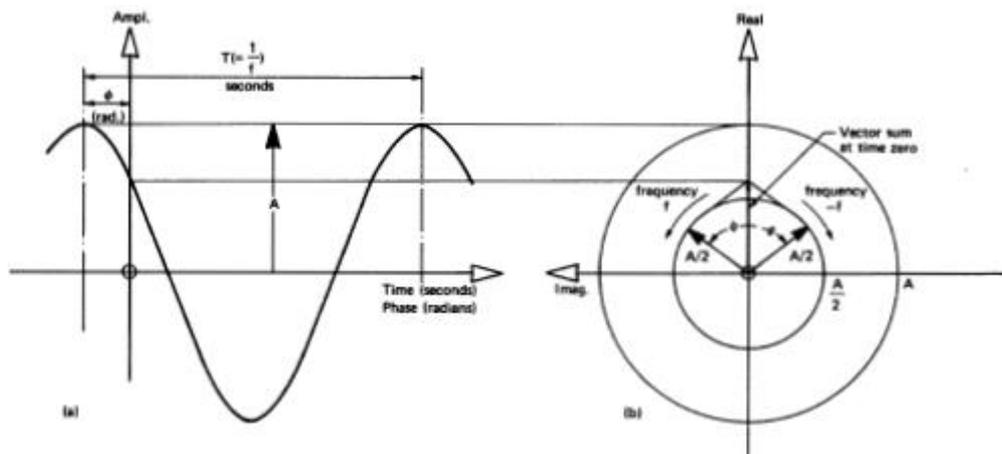


Figura 2-1. (a) Componente sinusoidal típico $A\cos(2\pi ft + \phi)$. (b) Representación como suma de vectores contrarrotatorios.

2.1. Series de Fourier

Si tenemos una función periódica $g(t)$ tal que $g(t) = g(t + nT)$, donde T es el periodo y n es cualquier número entero, entonces esta función se puede representar como una suma de componentes sinusoidales a frecuencias equiespaciadas kf_1 , donde f_1 es la inversa del periodo y k es cualquier entero. La k -ésima componente se obtiene de la integral:

$$G(f_k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t)e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (2-1)$$

, siendo $f_k = kf_1$, el k -ésimo armónico de f_1 .

Vale la pena pararse a examinar en detalle lo que esta integral hace. Si la señal $g(t)$ contiene un componente que gira a una frecuencia de f_k , entonces multiplicando por el vector unitario $e^{-j2\pi f_k t}$, el cual rota a frecuencia $-f_k$ anula la rotación del componente de la señal el cual se integra con el tiempo hasta un valor finito.

Es de interés en este caso, que el efecto de multiplicar la señal por $e^{-j2\pi f_k t}$, no es más que desplazar el origen de frecuencia a f_k , y así todos los armónicos originales seguirán siendo armónicos de la señal de tiempo modificada.

Como consecuencia la ecuación anterior tiene el hecho de extraer de $g(t)$ los componentes que contiene que giran a cada frecuencia f_k . Al mismo tiempo, esta congela el ángulo de fase de cada una de estas componentes, como el ángulo que existe cuando el tiempo vale cero, es decir $e^{-j2\pi f_k t} = 1$. La actual posición de cada vector en cualquier tiempo t puede ser obtenida multiplicando este valor inicial $G(f_k)$ por el opuesto al vector unitario de rotación $e^{j2\pi f_k t}$, siendo la señal total $g(t)$ el vector suma de todos los vectores en sus posiciones instantáneas:

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(f_k) e^{j2\pi f_k t} \quad (2-2)$$

El conjunto de valores (complejos) $G(f_k)$ son conocidos como los componentes del espectro de $g(t)$, y como cada componente tiene asociada una amplitud y una fase (o equivalentemente una parte real y una parte imaginaria), una representación completa requeriría tres dimensiones.

En este apartado pueden hacerse varias observaciones importantes:

- Una señal periódica en el dominio del tiempo, tiene un espectro discreto en el que todos sus componentes caen a frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental f_1 . La razón de esto se puede entender fácilmente. El tiempo que tarda en hacer una rotación el vector a la frecuencia fundamental f_1 es el periodo T . Puesto que todos los demás vectores giran a velocidades que son múltiplos enteros de f_1 , todos girarán un número entero de vueltas durante este tiempo y todos volverán a sus posiciones de partida. Así, después del tiempo T , todo el proceso comenzará a repetirse exactamente y la función será claramente periódica con el período T .
- Como la función $g(t)$ es real, como ocurre con la mayoría de señales físicas, entonces cada componente a la frecuencia f_k debe corresponderse con la componente a la frecuencia $-f_k$, la cual tiene igual amplitud pero fase opuesta lo que equivale a decir que tiene igual parte real pero opuesta parte compleja. De esta manera la parte imaginaria a todas las frecuencias se cancelará siempre y el resultado será real. Esto es obvio para una componente sinusoidal simple aunque se aplica a casos más generales. Se puede decir que el espectro de una función de valor real es conjugado.

$$G(f_k) = G^*(-f_k) \quad (2-3)$$

- Una relación muy importante se refiere a la distribución de la potencia contenida de la señal con la frecuencia. La potencia instantánea de una señal en el tiempo $g(t)$ es igual $[g(t)]^2$, y la potencia media de un periodo se obtiene de integrar el valor instantáneo de frecuencia durante un periodo y dividirlo por el periodo.

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T \{g(t)\}^2 dt \quad (2-4)$$

Para una onda sinusoidal típica de la forma $A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k)$ la potencia media es:

$$P_{media} = \frac{A_k^2}{2} \quad (2-5)$$

Este es el resultado es el conocido valor cuadrático medio de una senoide de amplitud de pico A_k y la raíz cuadrática media, RMS, que vale $A_k/\sqrt{2}$.

2.2. Transformada de Fourier

Todos los resultados anteriores se aplican a señales periódicas, pero es posible extender la ecuación de $G(f_k)$ a casos más generales haciendo que $T \rightarrow \infty$, en cuyo caso el espacio $1/T$ entre los armónicos tiende a cero y $G(f)$ se convierte en una función continua en f .

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-6)$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} dt \quad (2-7)$$

La ecuación que permite calcular $G(f)$ se conoce como transformada directa, mientras que la ecuación $g(t)$ se conoce como transformada inversa, juntos forman el 'Par transformador de Fourier'. Puede verse que ambas funciones son casi simétricas, la única diferencia es el signo del exponente de e . La cosa más importante de la simetría es que los resultados que se aplican a la transformación en una dirección, generalmente también se aplican a la transformación en la otra dirección.

2.3. Funciones muestreadas en el tiempo

Otra forma del par transformador de Fourier se aplica a funciones muestreadas en el tiempo, por ejemplo funciones las cuales son representadas por 'series de tiempo', una secuencia de valores discretos en puntos equiespaciados de tiempo. Este sería el caso cuando se realiza un procesamiento digital de datos.

Se puede ver que se trata de una situación que es la inversa del caso de la serie Fourier, debido a la simetría del par transformador de Fourier. En consecuencia, el espectro se vuelve periódico, con un periodo igual al de la frecuencia de muestreo, f_s (inversa del intervalo de tiempo entre muestras Δt)

Esta forma particular de transformada de Fourier de funciones muestreadas en el tiempo es:

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t_n)e^{-j2\pi ft_n} \quad (2-8)$$

$$g(t_n) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} G(f)e^{j2\pi ft_n} dt \quad (2-9)$$

, donde $t_n = n\Delta t$, el tiempo correspondiente a la n -ésima muestra.

2.4. Transformada de Fourier Discreta

La última posibilidad ocurre cuando la función sea muestreada a la vez en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia. Debido al muestreo de la función, es evidente que tanto la señal de tiempo como el espectro de frecuencias son periódicos, y esta periodicidad conduce a un efecto interesante que se discutirá posteriormente.

La transformada directa toma ahora la siguiente forma:

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2-10)$$

Y la transformada inversa toma la forma:

$$g(n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(k)e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2-11)$$

Como se puede ver en las expresiones anteriores, las integrales infinitas de la transformada de Fourier se han transformado en sumas finitas. Esto se conoce como Transformada Discreta de Fourier o DFT, que se adapte mucho mejor a la computación digital. Aun así, se puede ver que para obtener N componentes de frecuencia de N muestras de tiempo, o viceversa, se requiere N^2 multiplicaciones complejas. Un procedimiento de cálculo conocido como Transformada Rápida de Fourier o FFT, el cual obtiene el mismo resultado con $N \log_2 N$ multiplicaciones complejas.

De la ecuación (2-10) , se saca la siguiente ecuación matricial:

$$\overline{G}_k = \frac{1}{N} A \overline{g}_n \quad (2-12)$$

, siendo \overline{G}_k es una matriz cuyas columnas representan las N componentes de frecuencia complejas, $1/N$ es un factor de escalado, A es una matriz cuadrada de vectores unitarios y \overline{g}_n es un vector columna que representa las N muestras de tiempo.

Todas las frecuencias anteriores a $k = N/2$ son más fácilmente interpretadas como frecuencias negativas. Esto quizás se entienda más fácil entendiendo el Teorema de Muestreo de Shannon¹. Hemos visto en la ecuación (2-3) que los componentes de frecuencia negativa de una función de tiempo de valor real se determinan con respecto a los componentes de frecuencia positiva y, por lo tanto, si hubiera componentes de frecuencia por encima de la frecuencia de Nyquist (mitad de la frecuencia de muestreo o media revolución por muestra de tiempo) entonces eso se convertiría en complicado mezclado con los componentes de frecuencia negativa requeridos, introduciendo así un error.

La periodicidad del espectro de una función muestreada en el tiempo, se puede entender mirando la ecuación matricial (2-12). La primera fila de A podría igualmente representar la frecuencia de muestreo f_s (una revolución por muestra de tiempo) o $2f_s$, y así sucesivamente, y así la matriz A podría representar igualmente las frecuencias $k = 8$ a $15, 16, \dots$. Puesto que el vector giratorio sólo se muestrea en puntos discretos en el tiempo, toda la información se pierde sobre cuántas revoluciones completas pueden ocurrir entre muestras. Sin embargo, la restricción del contenido de frecuencia a menos de la mitad de la frecuencia de muestreo elimina la ambigüedad.

La interpretación errónea de frecuencias altas (por encima de la mitad de la frecuencia de muestreo) como frecuencias más bajas, se denomina "aliasing", y esto es evidentemente una de las trampas a evitar cuando se digitaliza la señal continua. Puede ayudar en la comprensión del aliasing, considerar un caso práctico con el cual la mayoría de la gente está familiarizada.

Las ruedas de carro en películas del oeste a menudo parecen correr hacia atrás o muy lentamente hacia delante debido al muestreo involucrado en la filmación.

2.4.1 FFT para series de valores reales

Hasta ahora no se ha hecho distinción entre las muestras de tiempo $g(n)$ y los valores del espectro de frecuencia $G(k)$, pero en la práctica es común que los valores $g(n)$ sean reales, mientras que los valores $G(k)$ sean complejos. El algoritmo de FFT es igualmente válido para valores reales o complejos. Sin embargo si se aplica a datos reales, habrá dos problemas:

- La parte imaginaria de cada valor de datos de entrada será cero y la mitad de la memoria será usada para almacenar ceros.

¹ El teorema de muestreo de Shannon establece que una señal muestreada en el tiempo no debe contener componentes a frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo (la llamada frecuencia de Nyquist)

- La segunda mitad del espectro resultante, por ejemplo de las frecuencias f_N a f_s también representan las frecuencias negativas de $-f_N$ a cero, y puesto que estos últimos son los conjugados complejos de los valores de frecuencia positivos, no es necesario almacenarlos por separado.

Es posible eliminar dichos problemas por medio de un algoritmo el cual transforma N valores reales como si estos fueran $N/2$ valores complejos, y entonces manipular el resultado para obtener la primera mitad del espectro de los puntos de datos originales. La mayoría de los sistemas FFT operan de esta manera. Es de notar que como consecuencia de la antisimetría de los componentes imaginarios del espectro de funciones reales, los componentes de frecuencia cero (DC) y de frecuencia de Nyquist son números reales y de hecho aparecen en los componentes reales e imaginarios, respectivamente, de los primeros números complejos del espectro de salida. Todos los otros números complejos son los componentes reales de la frecuencia distribuidos linealmente hasta $f_N \times (N - 2)/N$, es decir, un poco menos de la frecuencia de Nyquist. Es posible mover los componentes de la frecuencia de Nyquist a sus posiciones correctas al final de la tabla, pero entonces se requeriría $(N/2 + 1)$ posiciones de almacenamiento (complejas). En este caso no suele ser necesario, ya que para evitar el aliasing es deseable que el componente de frecuencia Nyquist sea cero, o al menos tan pequeño que no sea utilizable.

2.4.2 Limitaciones del procesamiento FFT

Tal y como se dijo anteriormente, el algoritmo de FFT produce un resultado idéntico al de la aplicación directa de la DFT. Por lo tanto cualquier limitación del proceso FFT son las del DFT. Estas son debidas básicamente a la naturaleza finita (circular) y discreta del algoritmo de la DFT. Independientemente de la naturaleza de la señal real de entrada, el registro analizado y los resultados, son un número finito, N , de muestras digitales discretas, representando en teoría un periodo de una señal de períodos infinitamente largos.

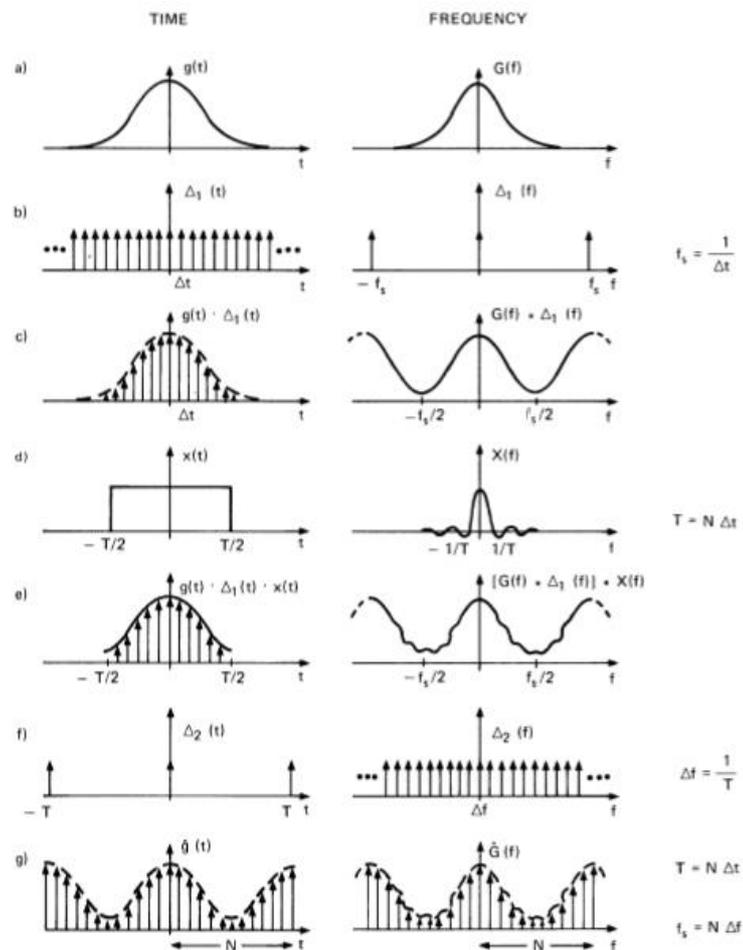


Figura 2-2. Limitaciones del proceso FFT.

En la Figura 2-2(a) muestra una señal de tiempo $g(t)$ y su espectro de Fourier $G(f)$, suponiendo que ambos son infinitamente largos. El primer paso en el análisis digital es hacer un muestreo discreto de la señal de tiempo, el cual, como se muestra en la Figura 2-2(b) se considera equivalente a un tren de impulsos $\Delta_1(t)$ con un intervalo de muestreo Δt . Su transformada de Fourier $\Delta_1(f)$ es igualmente un tren de impulsos, con impulsos en todos los múltiplos de la frecuencia de muestreo $f_s = 1/\Delta t$. La Figura 2-2(c) muestra el resultado de esta multiplicación en el dominio del tiempo, el cual en el dominio de la frecuencia corresponde a una convolución de los dos espectros. Por lo tanto se ve que cualquier componente de frecuencia en el espectro original $G(f)$ que se extiende más de la mitad de la frecuencia de muestreo, se superponen en esa región y causan aliasing. Este es el primer problema a ser tratado cuando se usa la DFT.

El siguiente paso en este procedimiento, representado en la Figura 2-2(d) y (e), muestran el efecto de la limitación de tiempo necesaria para ajustar la señal de tiempo en un registro de longitud finita. Esto es equivalente a la multiplicación por una función de ventana de tiempo, en este caso rectangular, de modo que una vez más haya una convolución en el dominio de la frecuencia, esta vez con la transformada de Fourier de la función de ventana de tiempo. El efecto de la función de ventana no es muy grande en el espectro de frecuencias liso ilustrado, pero para una señal que contenga componentes de frecuencia discretas, como por ejemplo la función Delta, estos componentes se sustituyen por la función de ventana. Estos efectos son conocidos como ‘efectos de ventana’, ‘generación de lóbulos laterales’ o ‘leakage’. Este es el segundo efecto a tratar cuando se usa la DFT.

El último efecto se muestra en la Figura 2-2(f) y (g) y es conocido como ‘efecto de cerca de estaca’. No es posible representar el espectro continuo de la Figura 2-2(e) en una memoria digital y por lo que también debe ser discretamente muestreados. De ahí el nombre, ya que puede ser considerado como espectador a través de las hendiduras en una estaca Figura 2-3. Por analogía con las etapas de la Figura 2-2(b) y (c), el muestreo discreto en el dominio de la frecuencia corresponde a una repetición periódica del registro de tiempo, con un período igual a la longitud de registro.

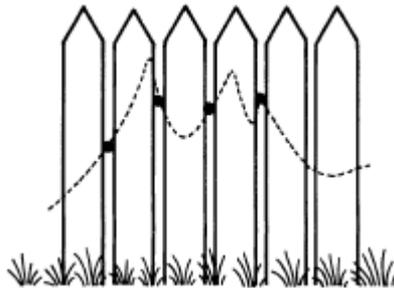


Figura 2-3. Picket Fence Effect.

Estos tres efectos y cómo tratar con ellos, serán discutidos con más detalle en los apartados siguientes.

2.4.2.1 Aliasing

El problema del aliasing es inherente al muestreo de una señal cuyo contenido en frecuencia se extiende hasta altas frecuencias. Para poder para poder coger el espectro de una señal hasta una frecuencia determinada f_{max} es necesario muestrear de forma que se tengan al menos dos puntos por ciclo, es decir, la frecuencia de muestreo, f_s , debe ser $f_s > 2f_{max}$. Fijada una f_s , las frecuencias mayores de $f_s/2$ (frecuencia de Nyquist) aparecerán en la señal muestreada como frecuencias menores de $f_s/2$.

Este problema resulta de la discretización de una señal continua. Con este proceso, la existencia de frecuencias muy altas puede ser mal interpretada si la velocidad de muestreo no es lo suficientemente elevada.

Para evitar el aliasing se emplea un filtro de paso-bajo. Pero los filtros no son perfectos, por lo que las medidas de frecuencia próximas a la de Nyquist se deben rechazar. En las figuras que aparecen a continuación se muestran dos ejemplos de las distorsiones que produce el aliasing sobre los espectros.

Es ocasionado por el muestreo en el tiempo. Se soluciona empleando un filtro antialiasing con frecuencia de corte f_c y una frecuencia de muestreo de $f_s > 2f_c$. El filtro anti-aliasing lo que hace es eliminar las componentes de alta frecuencia de las señales analógicas medidas.

2.4.2.2 Leakage

Este error es consecuencia de aplicar la Transformada de Fourier, definida para funciones periódicas en el dominio del tiempo, a intervalos de señal considerados periódicos sólo en un rango, es decir, es ocasionado por la limitación temporal de la medida. La señal analógica se muestrea con un número finito de puntos, N , y esta es la razón de que aparezca este problema. Se debe a que la Transformada de Fourier Discreta asume que la señal es periódica en la longitud de muestreo. Se puede evitar mediante el empleo de funciones ventana, que multiplican a la señal original o bien aumentando la resolución en frecuencia.

El uso de ventanas puede producir una reducción de la resolución del espectro, ensanchando sus picos. Como consecuencia se reduce la amplitud de los picos, produciéndose un error significativo. Este fenómeno por el que el espectro presenta frecuencias diferentes de las existentes en la señal recibe el nombre de “leakage” cuya traducción es “fuga” o “derrame”, ya que el efecto es como si parte de la señal se fugara hacia otras frecuencias del espectro.

2.4.2.3 Efecto *Picket Fence*

Es ocasionado como efecto de la naturaleza de frecuencia discreta de la FFT, porque el muestreo discreto en el dominio de la frecuencia corresponde a una repetición periódica del registro de tiempo, con un período igual a la longitud de registro. Como consecuencia, existirán ciertas frecuencias de la señal original cuya amplitud se verá reducida y repartida entre sus vecinas. Si esta frecuencia se encuentra bien separada de otros componentes principales, es posible realizar una corrección mediante una curva que se ajuste a los valores presentes en las frecuencias vecinas, reconstruyéndose el pico en toda su magnitud.

3 TIPOS DE SEÑALES

La división más fundamental en diferentes tipos de señal es en señales estacionarias y no estacionarias. Las funciones estacionarias se interpretan como aquellas cuyas propiedades medias no varían con el tiempo y, por lo tanto, son independientes del registro de muestra particular utilizado para determinarlas.

Aunque el término “no estacionario” cubre todas las señales que no cumplen con los requisitos de una señal estacionaria, la mayoría de las señales no estacionarias útiles son tales que pueden dividirse en secciones quasi estacionarias cortas.

El proceso de dividir dicha señal continua en secciones cortas se denomina “ventana de tiempo” porque la señal total se puede considerar que se ve a través de una ventana que transmite solamente la porción de interés. La manera más simple de aplicar tal ventana es cortar la señal en cada extremo. Esto puede considerarse como una multiplicación por una función de ponderación rectangular de longitud T , que da una ponderación uniforme a lo largo de la muestra seleccionada.

Puesto que las señales que son de nuestro interés no son estacionarias se va a profundizar en ellas.

3.1. Análisis de barrido

Análisis de barrido es término dado a la técnica por la cual una función de ventana como la de Hanning es desplazada a lo largo de un registro de datos en etapas superpuestas, obteniéndose un espectro de tiempo reducido (Short-time Fourier transform, STFT) para cada posición. De esta manera un trozo pequeño de una señal puede ser aislado por una ventana y analizado por separado. Los resultados dependen en cierta medida de la elección de los parámetros del análisis tales como el rango de frecuencia, el tipo de ventana, la longitud de la ventana, y la trama por lo que estos asuntos serán discutidos en primer lugar.

3.1.1 Elección de los parámetros de análisis

En cuanto a la elección del tipo de ventana, se podría utilizar cualquier función de ventana que sea suavemente redondeada, como por ejemplo la de Hanning. Puede que esta sea probablemente la mejor opción para las siguientes razones:

- Se genera de forma simple, y está disponible en la mayoría de los analizadores.
- Tiene un ancho de banda relativamente estrecho, comparado con la mayoría de las ventanas.
- La selectividad de la característica de filtro es menos probable que sea importante (en comparación con las señales estacionarias), ya que es probable que esté limitada por la propia señal (es decir, la no estacionariedad menor dentro de la ventana)
- Con ventanas que se solapan, los espectros individuales pueden promediarse juntos para obtener el espectro de una porción mayor de la señal con una ponderación uniforme.

Por lo tanto, la mayor parte de la discusión restante asumirá el uso de ventanas Hanning.

La longitud de la ventana debe ser elegida con respecto a los siguientes criterios:

La ventana debe ser suficientemente corta para que la señal dentro de ella no varíe mucho. Para señales continuas tales como los run-downs de la máquina o vocales en el habla, esto significa que la porción de ventanas debe ser quasi-estacionaria. Para una señal impulsiva tal como vibraciones de la máquina alternativa, o consonantes oclusivas en la voz, la longitud de la ventana debe ser lo suficientemente corta para aislar los diversos impulsos entre sí. Por otro lado, la ventana no debe ser tan corta como para restringir la resolución del análisis (más allá de lo determinado por las variaciones en la propia señal) y debe ser al menos el doble de largo que los impulsos individuales. La longitud efectiva de la ventana (para la ponderación Hanning) se puede tomar como la mitad de la longitud total, T .

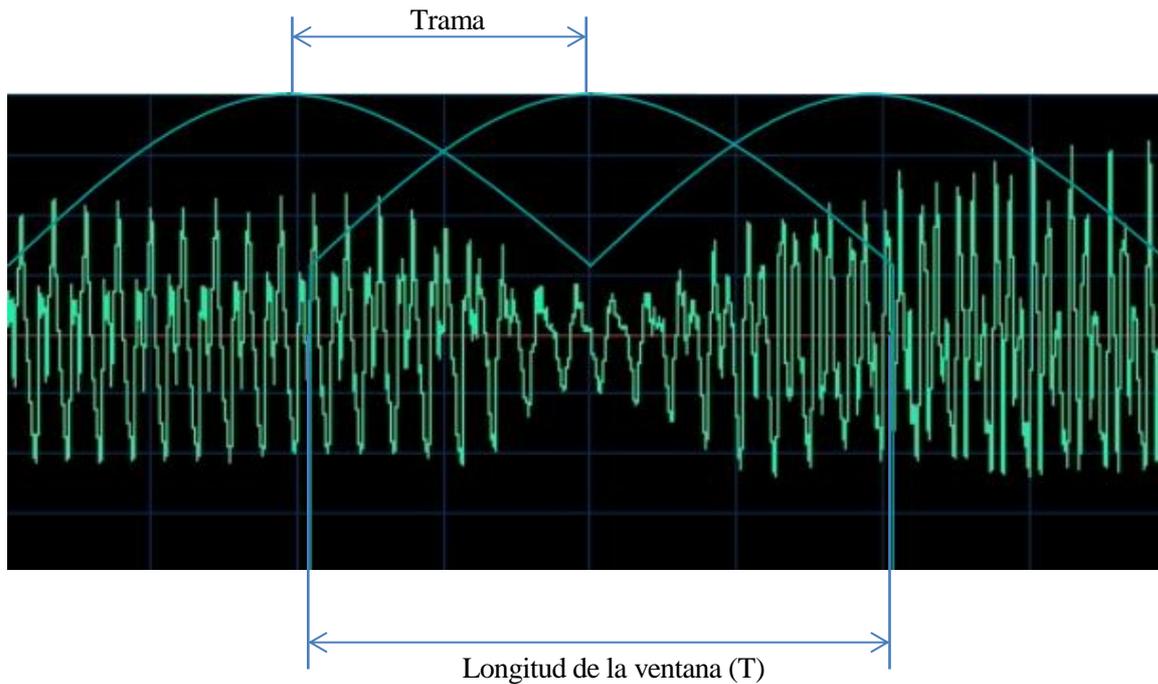


Figura 3-1. Señal enventanada.

Se llama trama a la distancia entre dos ventanas consecutivas, mientras que la longitud efectiva de la ventana es el solape entre dos intervalos consecutivos. Tal y como se ha representado en la Figura 2-3, y como se dijo anteriormente, para la ventana de Hanning, la longitud efectiva de la ventana es la mitad de la longitud de la ventana.

Hay que tener en cuenta que cuando se utiliza la ventana Hanning interna del analizador FFT, su longitud se selecciona indirectamente al elegir el intervalo de frecuencias. En ocasiones este intervalo tiene que ser seleccionado más alto que el requerido de otro modo para obtener una ventana suficientemente corta. En tales casos la porción del espectro fuera del rango de interés puede simplemente ser eliminada de la pantalla.

Con respecto a la elección de la trama, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- (1) Si se hace igual a la longitud efectiva de la ventana (es decir, 50% de superposición) los análisis sucesivos estarán efectivamente sin correlación y constituirían el número mínimo de espectros para representar la totalidad de la señal sin pérdida de información.
- (2) Para visualizaciones tridimensionales (es decir, diagramas de cascada) de señales que varían arbitrariamente (por ejemplo, el habla), será normalmente ventajoso reducir la longitud del escalón a menos de la mitad del máximo sugerido en (1) (es decir, superposición <75%). Por lo tanto, análisis sucesivos serán parcialmente correlacionados, lo que ayuda a la interpretación visual de los diagramas 3D.
- (3) En los casos donde la señal es bastante predecible, por ejemplo en los run-downs de las máquinas, no es necesario satisfacer el requisito de (2), y de hecho la longitud del escalón puede ser incluso mayor que la longitud de la ventana. Los espectros individuales en un diagrama de cascada, por ejemplo, a menudo se separan por incrementos uniformes en la velocidad del eje, que pueden representar intervalos de tiempo considerablemente más largos que la longitud de la ventana. De hecho, para las señales de máquinas que varían lentamente, puede ser ventajoso utilizar un promedio (normalmente promediado exponencial sobre, digamos, 8 espectros) con el fin de suavizar componentes aleatorios en el espectro. Esto debe ser equilibrado contra el manchado de componentes armónicos discretos debido a la ventana efectivamente más larga obtenida.

3.1.2 Señales cíclicas

En la Figura 3-2 se muestra una señal cíclica típica, una señal de vibración de un motor diésel, e indica cómo se puede analizar para determinar la forma en la que el espectro cambia a lo largo del ciclo.

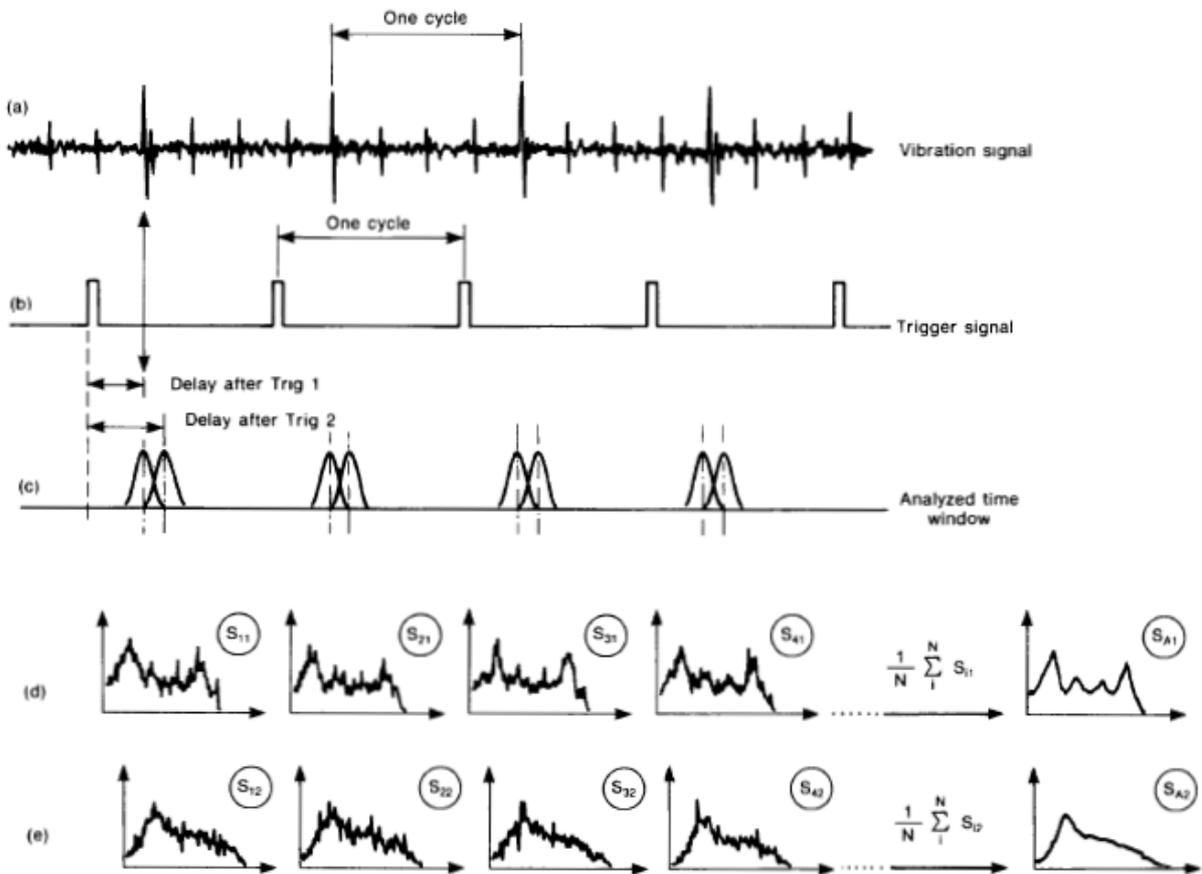


Figura 3-2. Técnica de análisis de señales cíclicas.

La señal original (Figura 3-2 (a)) se ve dominada por una serie de impulsos (los dominantes son los correspondientes al disparo de cada cilindro) que pueden separarse entre sí mediante una elección adecuada de una ventana de los parámetros de análisis. Se utiliza un impulso de activación de un por ciclo (Figura 3-2(b)) para posicionar la ventana Hanning en una parte particular del ciclo, usando un retardo variable después del disparo para variar su posición (Figura 3-2(c)). Incluso en una posición, se observa que los espectros de los ciclos individuales varían algo, pero si un número es promediado conjuntamente (por ejemplo, más de 32 ciclos) los resultados se estabilizan y son típicos en esa parte del ciclo (Figura 3-2(d & e))

En la Figura 3-3 se muestra los resultados de dicho análisis (promediados en 64 ciclos) mostrados en un diagrama tridimensional de cascada. Puede verse claramente las variaciones con el tiempo, por ejemplo cuándo ocurre el disparo de los cilindros individuales, pero además el análisis en frecuencia da la posibilidad de separar eventos que se producen aproximadamente al mismo tiempo, pero que tienen diferentes contenidos en frecuencia.

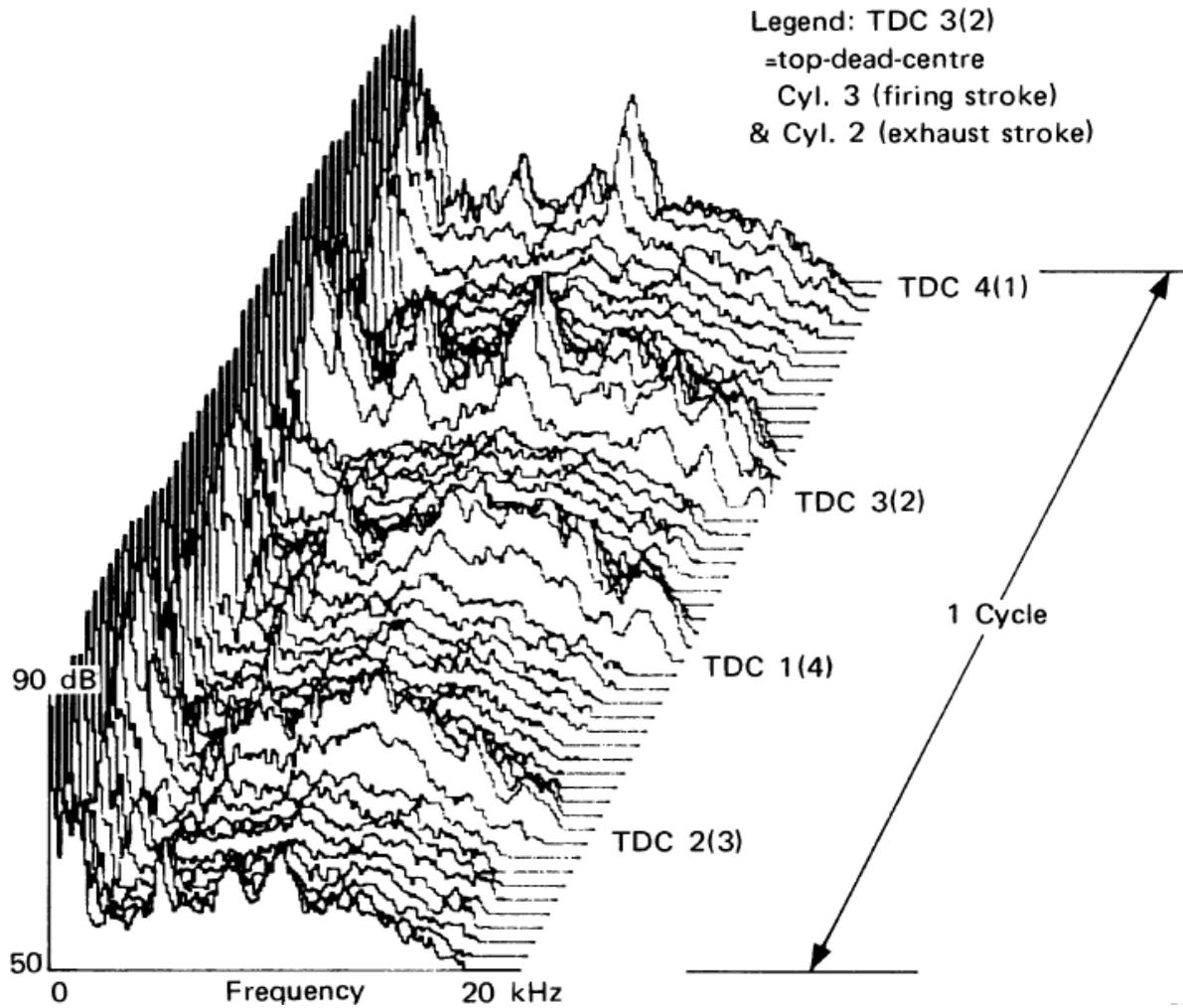


Figura 3-3. Representación frecuencia-tiempo del ciclo de un motor diesel.

Los parámetros de análisis de la Figura 3-3 se seleccionaron de la siguiente manera: el motor era un cilindro, motor diésel de 4 tiempos que funcionaba a 1500 rpm.

3.1.3 Variaciones espectrales debido a la velocidad de la máquina

A menudo se desea investigar la forma en que las vibraciones de la máquina (y el sonido) varían con la velocidad del eje, y una de las mejores maneras de hacerlo es presentar los resultados en un mapa espectral tridimensional, como se ilustra en la Figura 3-4.

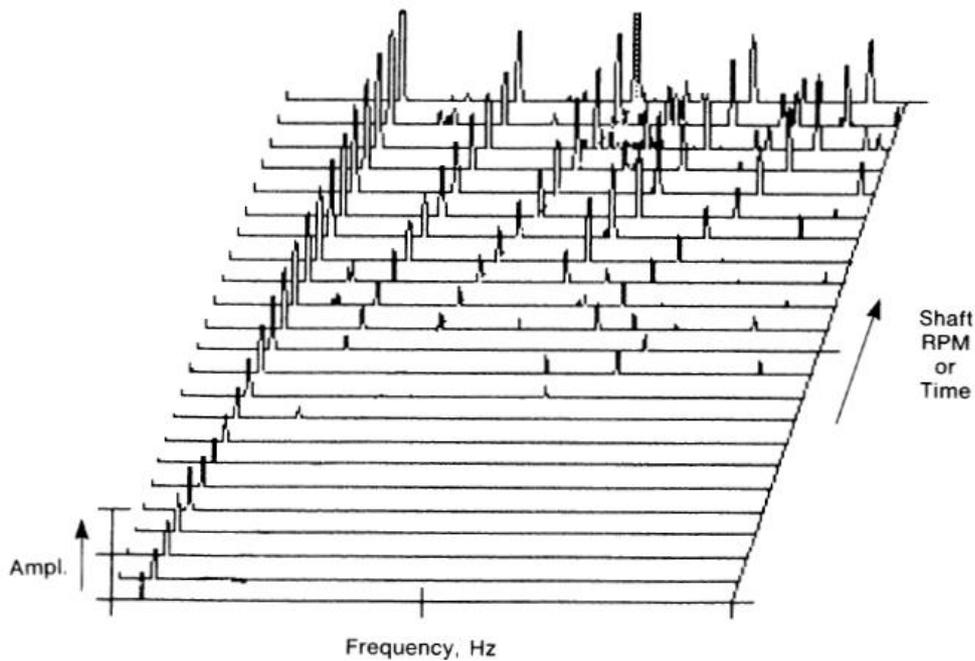


Figura 3-4 . Mapa espectral tridimensional. Diagrama de cascada.

Como se indica, el tercer eje (que puede estar inclinado como se muestra, o vertical) puede ser el tiempo, o la velocidad del eje en rpm. Un mapa espectral tridimensional de este tipo se denomina a menudo espectro de captura. Un mapa espectral tridimensional se conoce a menudo como un diagrama de cascada, aunque este término a veces se refiere a una presentación en vivo, actualizada continuamente a medida que se generan nuevos espectros. Cuando el tercer eje representa los ejes RPM, el mapa espectral se refiere a veces como un "diagrama de Campbell", aunque estrictamente hablando un diagrama de Campbell tiene el eje de la frecuencia vertical, el eje del RPM horizontal, y la amplitud espectral indicada por el diámetro de un círculo en cada punto del diagrama (Figura 3-5)

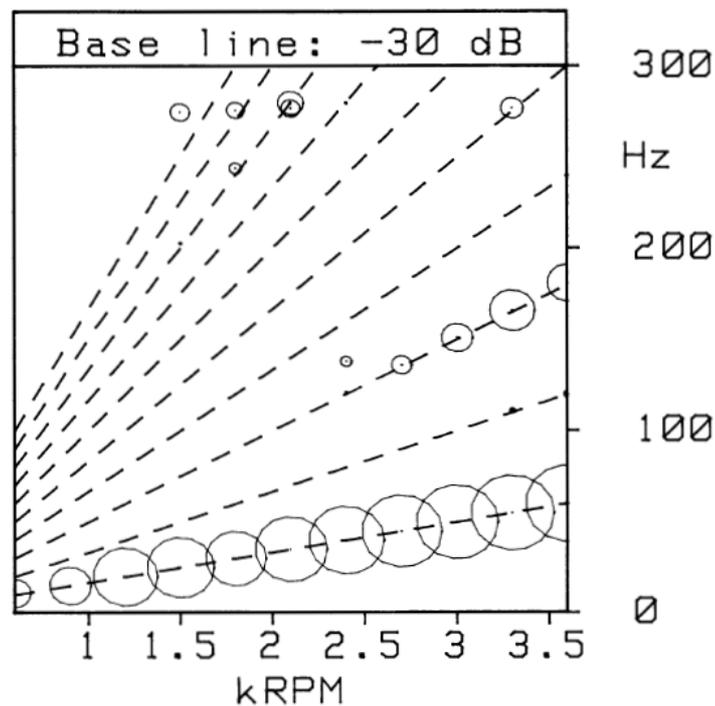


Figura 3-5 . Ejemplo de un diagrama de Campbell.

La Figura 3-6 es un mapa espectral (con la velocidad del eje como el tercer eje) que ilustra la ventaja de este tipo de visualización. Se obtuvo durante el arranque de un pequeño motor eléctrico, con espectros tomados a intervalos de velocidad del eje de 2,5 Hz entre 20 Hz (1200 rpm) y 75 Hz (4500 rpm). Esto ilustra la forma en que los diversos armónicos caen a lo largo de las líneas radiales y, por lo tanto, pueden separarse de componentes de frecuencia constante (tales como resonancias y componentes relacionados con la frecuencia fundamental) que siguen líneas paralelas al eje rpm (en este caso vertical). Este tipo de visualización es ideal para determinar si un problema de ruido o vibración dentro de un intervalo de velocidad particular se debe principalmente a un orden (y en caso afirmativo, cuál) o a una amplificación excesiva por una resonancia estructural.

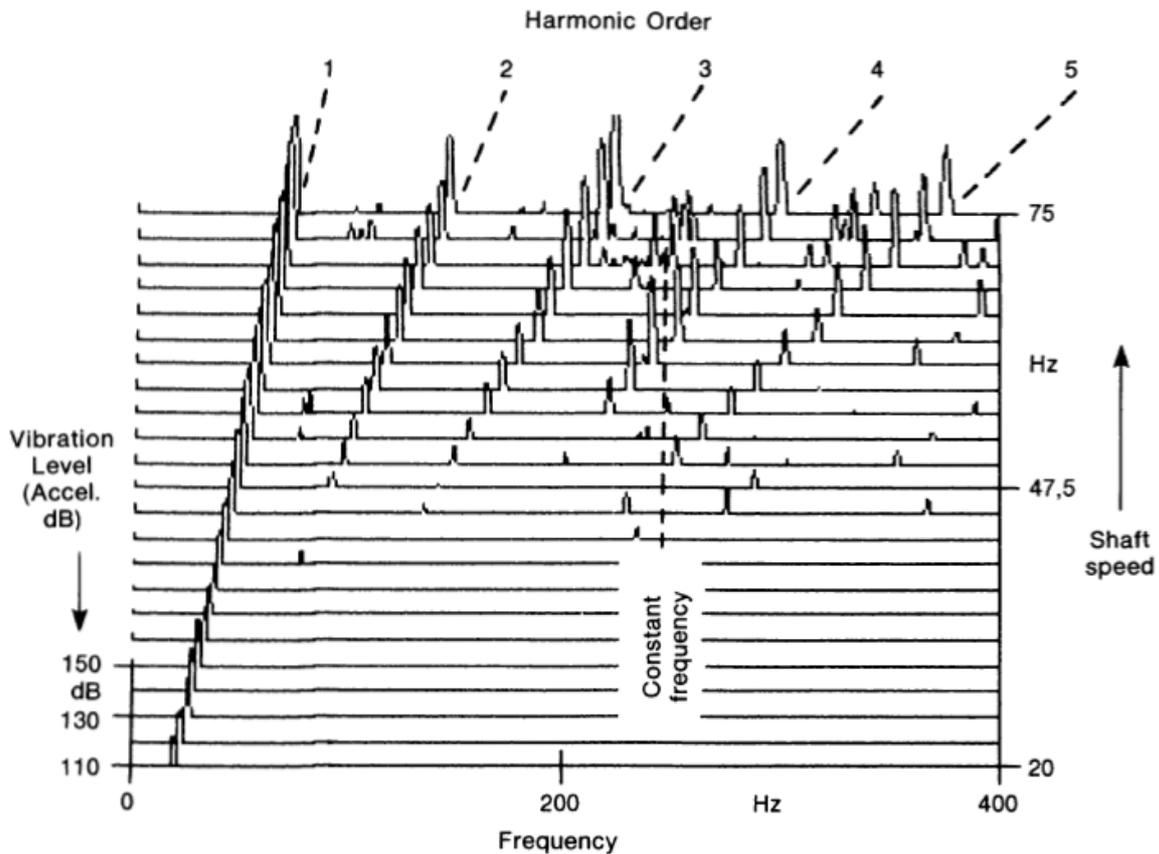


Figura 3-6. Mapa espectral con la velocidad del eje en el tercer eje, mostrando la separación entre armónicos de los componentes de frecuencia constantes.

Los espectros individuales para realizar un gráfico como ese, pueden ser capturados básicamente de tres formas diferentes, dependiendo del índice de aceleración (o deceleración) de la velocidad del eje.

- (1) Idealmente, la velocidad del eje debe ser constante a las respectivas rpm, a medida que se toma el espectro. Por lo tanto, todos los armónicos aparecerán como componentes de frecuencia discreta cuya amplitud en el diagrama indica directamente la fuerza del componente. Esto es a veces posible durante la puesta en marcha muy lenta de máquinas tales como grandes turbinas de vapor. El promedio lineal puede incluso ser utilizado para suavizar cualquier componente aleatorio.
- (2) Para velocidades intermedias de aceleración, los espectros se pueden capturar (mediante transferencia a una memoria digital) a intervalos predeterminados de velocidad del eje, ya sea de forma automática o manual. La velocidad del eje puede determinarse a partir de la propia señal (mediante selección del primer armónico), mediante el análisis simultáneo de una señal del tacómetro (por ejemplo, un impulso una vez por revolución) o de un indicador de velocidad del eje separado.
- (3) Para velocidades rápidas de aceleración, incluso más allá de la capacidad de tiempo real del analizador, es posible capturar la señal de tiempo en una memoria larga y analizarla mediante un análisis de exploración después del evento. La Figura 3-7 se obtuvo mediante el análisis de la señal

procedente del run-down de un pequeño motor eléctrico. Obsérvese que debido a la velocidad de aceleración, sobre todo en los armónicos más altos no aparecen como frecuencias discretas, sino que se manchan sobre un número de líneas que aumenta con el orden armónico. Por lo tanto, la altura del pico no representa directamente la amplitud del componente. Sería necesario integrar sobre el conjunto del pico distribuido para conseguirlo. Esto reduce la utilidad de este método de visualización en cierta medida, en casos como éste donde la velocidad de la máquina varía a lo largo de la longitud de la ventana.

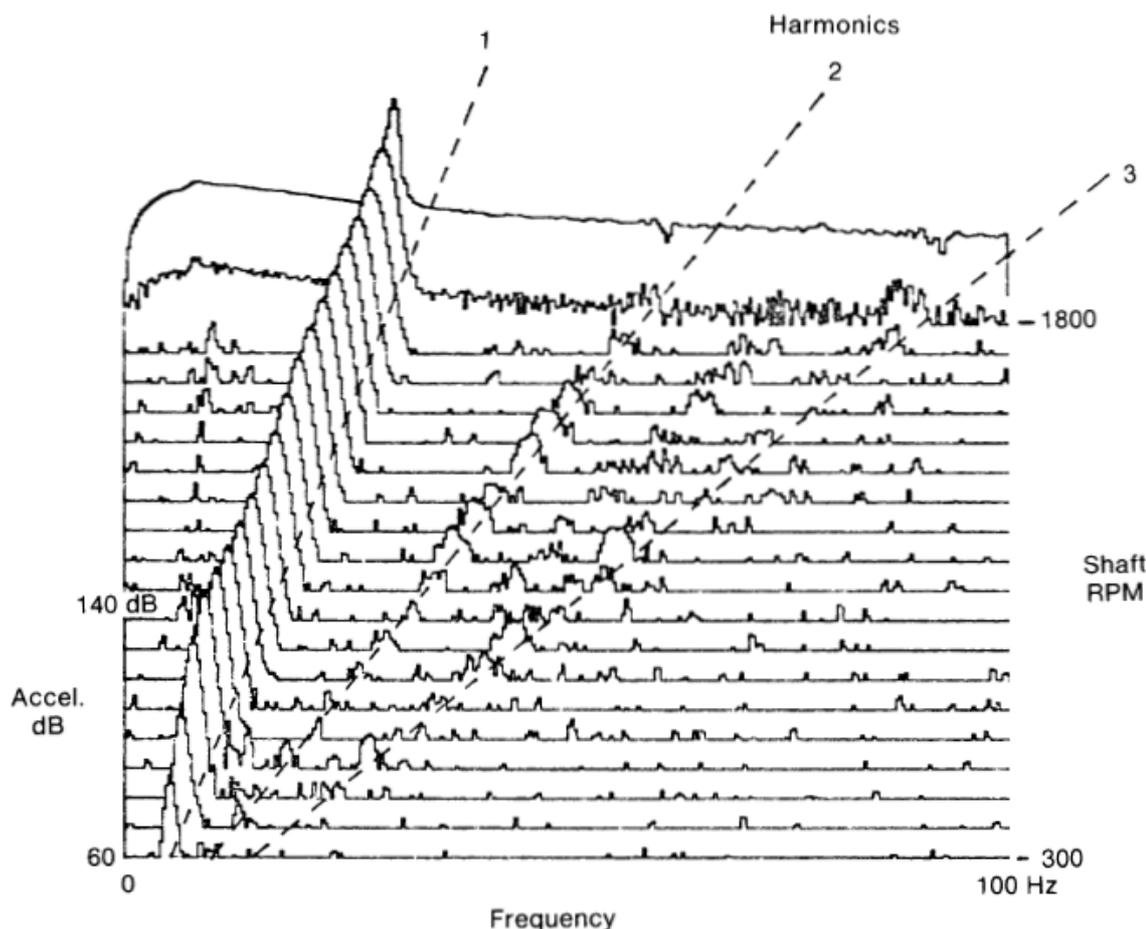


Figura 3-7. Análisis espectral del run-down de un pequeño motor eléctrico.

3.2. Análisis de Seguimiento de Órdenes

El interés de este análisis es estudiar el comportamiento de órdenes armónicos de la velocidad del eje (incluso órdenes altos como las frecuencias de un diente de engranaje). Además tiene la ventaja de eliminar el problema de "manchas", referido en el apartado anterior, forzando que el componente armónico esté situado en una línea de análisis. Esto se consigue controlando la frecuencia de muestreo del convertor analógico-digital (A/D) en sincronismo con la velocidad del eje. En la Figura 3-8 se ilustran los principios básicos.

En la Figura 3-8(b) se muestra una hipotética señal producida por un eje rotando durante un run-up (en la práctica la amplitud también varía con la velocidad del eje). En la Figura 3-8(a) se ilustra el registro de datos obtenido por muestreo de la señal con una frecuencia constante de muestreo (como para un análisis normal de frecuencia) y el espectro resultante de un análisis FFT de esas muestras. Se ve que el pico espectral se extiende sobre varias líneas correspondientes al cambio de velocidad a lo largo del registro de tiempo. En la Figura 3-8(c) se representan los datos obtenidos por muestreo de la señal en un número fijo de tiempos por revolución del eje (en este caso ocho). Las muestras son indistinguibles de aquellas que se han obtenido por un análisis normal a componente de frecuencia constante, y por ello el espectro se concentra en una línea.

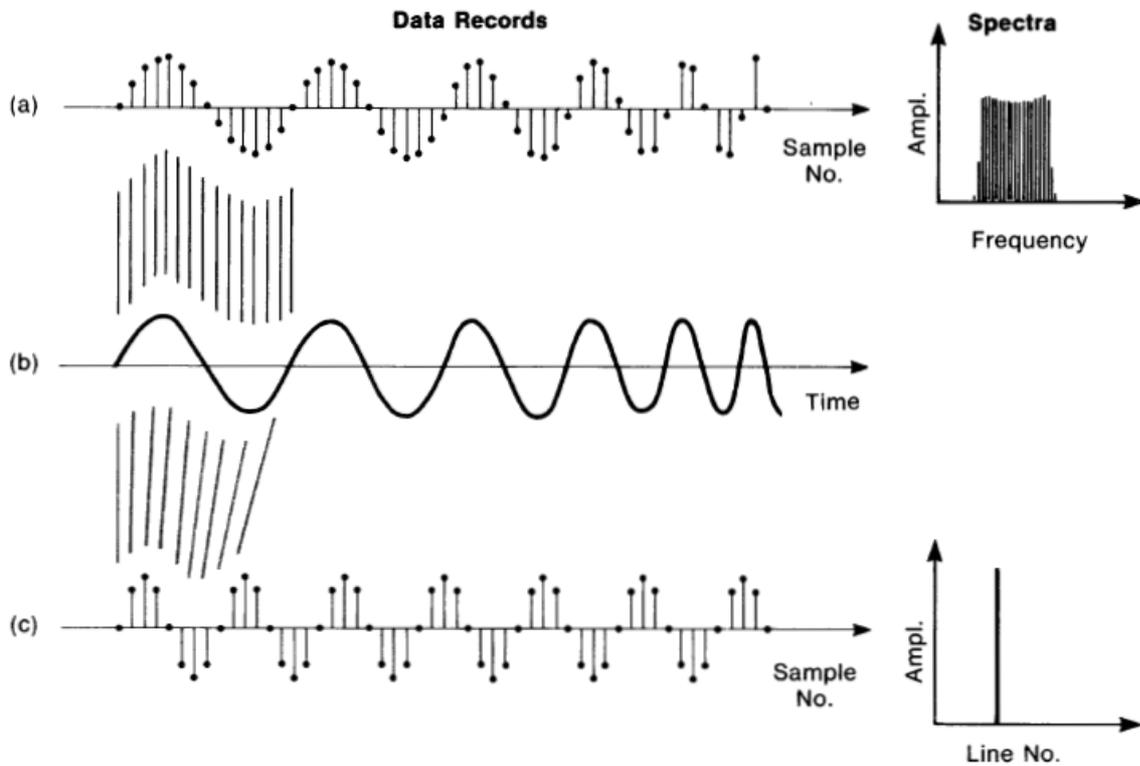


Figura 3-8 . (a) Análisis de un componente fundamental el cual es incrementado en frecuencia. Registro de datos resultante de un índice de muestreo uniforme, y su espectro el cual se extiende a lo largo de una banda de frecuencias correspondiente al cambio de frecuencia. (b) Señal de tiempo original. (c) Registro de datos resultante de un muestreo de 8 tiempos por ciclo fundamental y su espectro que se concentra en una línea de análisis.

4 INTRODUCCIÓN AL FALLO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Las máquinas rotativas son un grupo de mecanismos diseñados para cumplir una función específica (ej. reductores, bombas, agitadores, etc.). Así, todas las máquinas se componen de una parte generadora de movimiento (motor, biela), y otra parte que se encarga de llevar la energía a todos los mecanismos que la conforman (eje). Principalmente este último, es quien rige el funcionamiento y es la pieza principal, ya que este componente determina la velocidad de giro de la máquina y es el encargado de transmitir las vibraciones a todos los mecanismos presentes como elementos rodantes o rodamientos, ruedas dentadas, acoples y soportes.

La velocidad del eje de giro de la máquina, en términos de frecuencia, significa la frecuencia fundamental del sistema y cada mecanismo que forma parte de ella contribuye con una onda sinusoidal cuya frecuencia resulta ser un armónico de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, la frecuencia de giro de los rodamientos es igual al número de elementos rodantes que lo componen multiplicado por la velocidad de giro. Por tanto, es posible decir que la señal de vibración de una máquina es un conjunto de sinusoides superpuestas con diversas amplitudes y frecuencias que implican y determinan un estado general. La amplitud determina la severidad de la vibración y la frecuencia indica el mecanismo vibrante. Luego el malfuncionamiento de una máquina es detectado normalmente por cambios en la vibración.

Para detectar un tipo de fallo en específico se evalúa cada uno de los armónicos presentes en el espectro y estima su relación con la condición general de la máquina. Los armónicos que se encuentran en el espectro de vibración son múltiplos de la frecuencia de giro de la máquina y de acuerdo a la amplitud de uno o varios armónicos de esta, se clasifican varios tipos de fallos. Como ya se ha dicho en capítulos anteriores, los distintos armónicos que contiene la señal son conocidos también como órdenes, y en esta sección se denotan en forma resumida mediante una 'X' indicando que es un múltiplo de la frecuencia de giro fundamental. Un parámetro que resulta indispensable en el análisis de vibraciones es el punto de medida (ubicación del sensor), que puede ser radial (horizontal o vertical), donde el sensor se ubica perpendicular al eje, y axial, donde el sensor se ubica paralelo al eje. Cada punto de medida permite valorar el nivel de vibración bajo ciertas amplitudes, es decir, una medida axial permite observar un nivel de vibración diferente a una medida radial, y la clasificación de la severidad de vibración depende en gran parte de este parámetro.

4.1 Desequilibrio

El desequilibrio existe en toda máquina rotativa. Se dice que una pieza se encuentra desequilibrada cuando su centro de masa (centro de gravedad) no coincide con su centro geométrico, es decir cuando no coincide el eje de rotación y el eje longitudinal principal de inercia del rotor. Este eje, une todos los centros de gravedad de cada una de las infinitas secciones transversales que componen al rotor, que al no coincidir con el eje de rotación podrán inducir varios tipos de desbalances.

Cuando la vibración debido al desequilibrio excede los límites permitidos, se requiere equilibrar. Equilibrar es el acto de añadir o quitar de masa de un rotor de modo que la vibración inducida por desequilibrio cae por debajo de un nivel máximo aceptable.

Un rotor ideal tiene una forma geométrica simétrica y una distribución de masa radial uniforme. Sin embargo la práctica, la distribución de la masa radial de un rotor real no es uniforme por varias razones:

- Falta de homogeneidad en materiales, especialmente en fundiciones, en las cuales la presencia de burbujas de aire es una causa común de desbalanceo,
- Errores de maquinado y tolerancias en el proceso de manufactura,
- Cambio de componentes del rotor durante operaciones de mantenimiento,
- Desgaste irregular durante la operación de la máquina,

- Depósitos de material acumulados durante la operación de la máquina,
- Distorsión del rotor debida a gradientes de temperatura,

Por ejemplo, los álabes de una turbina de gas, independientemente del cuidado que se tenga al hacerlas, tendrán masas ligeramente diferentes. Las ranuras para montar los álabes en el disco no se localizarán exactamente en el mismo radio desde el centro del disco. Cuando se mecaniza un disco para que encaje en el rotor, el orificio no estará perfectamente centrado en el disco. El resultado es que la localización del centro de masa no coincida con el centro geométrico del disco, sino que estará situado a una cierta distancia radial del centro geométrico del sistema de rotor, y se situará en alguna posición angular particular.

Las características que rigen a la vibración por desequilibrio son las siguientes:

- Componente 1X estable en el espectro y la forma de onda en el tiempo. Esto implica que sea una señal sinusoidal pura.
- El nivel de amplitud del componente 1x se incrementa con la velocidad.
- Bajos niveles de vibración en los componentes de 2X, 3X, 4X, 5X, etc.

4.2 Desalineamiento

El desalineamiento constituye la razón de aproximadamente el 50% de los problemas de vibraciones que se presentan en la industria. La desalineación se genera cuando dos ejes conectados mediante un acoplamiento no se encuentran perfectamente colineales uno con respecto al otro. El desalineamiento también puede existir entre los cojinetes de un eje sólido o entre cualquier otro par de puntos de la máquina. Las máquinas industriales antiguas no tenían problemas excesivos de desalineamiento ya que operaban a velocidades y potencias bajas. Sin embargo, debido a mayores exigencias en las máquinas con el paso del tiempo, hoy en día se tiene un requerimiento mayor para mejorar el alineamiento.

Existen tres tipos de desalineamiento:

- paralelo, se define como el caso en que los dos ejes están separados paralelamente, y
- angular, ocurre cuando los dos ejes forman un ángulo entre sí a partir del centro de giro,
- combinado, cuando los dos ejes están separados entre sí y adicionalmente forman un ángulo

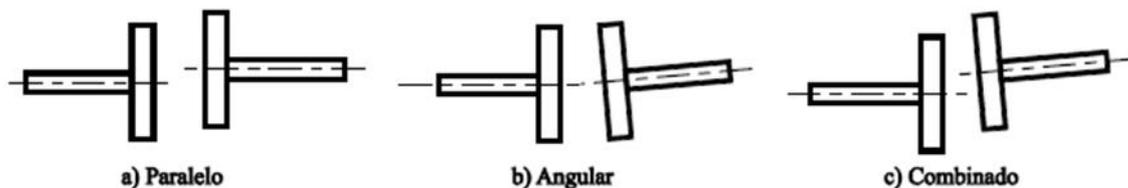


Figura 4-1. Formas prácticas de desalineamiento de ejes.

4.2.1 Desalineación angular

La desalineación angular se caracteriza por un predominio de la frecuencia de giro de la máquina, 1X. Si las mayores amplitudes ocurren en la dirección axial, es muy probable que se generen también las frecuencias 2X rpm, y 3X rpm, así como la frecuencia de trabajo de los elementos de unión del acople, llamada FTA (número de elementos de unión del acople multiplicado por las revoluciones del motor).

4.2.2 Desalineación paralela

La desalineación paralela posee síntomas de vibración similares a la angular, sin embargo, la frecuencia que predomina es la 2X.

4.2.3 Desalineación combinada

En el espectro de frecuencia se encuentran componentes a 1X, 2X y 3X.

4.3 Eje doblado

El doblamiento del rotor o del eje representa otro de los principales problemas de vibración con componente a 1X. En un ensamble del rotor horizontal, el eje presenta un cierto grado de flexión, debido a la influencia del propio peso, o debido a efectos térmicos. Los problemas de un eje doblado causan una alta vibración en la dirección axial.

El problema de torcedura del eje se asimila a un problema de desbalanceo, debido al predominio de la frecuencia de 1X. Por lo tanto, es importante estar seguros que el problema que se genera es torcedura por lo que se requiere realizar pruebas complementarias.

4.4 Resonancia

La resonancia ocurre cuando coinciden dos frecuencias, como puede ser la frecuencia de giro de la máquina, o una frecuencia forzada, con la frecuencia natural del sistema dando origen a amplitudes de la vibración grandes.

Normalmente la frecuencia de resonancia la genera la velocidad de giro de la máquina, cuando coincide con la frecuencia natural de la base, o de la cimentación, recibe el nombre de resonancia estructural. La mayoría de los problemas de resonancia en máquinas correctamente diseñadas son el resultado de la resonancia de elementos no rotatorios como pedestales, estructuras portantes, pisos, tuberías, vigas, columnas, cubiertas protectoras, etc.

Una forma simple de evitar una condición de resonancia es cambiando la velocidad de operación de la máquina, o cambiando la frecuencia natural del sistema o componente. El aumento de la rigidez eleva la frecuencia natural, y el aumento de masa disminuye la frecuencia natural.

Las características para identificar una resonancia son varias

- Cambio de fase de 90° con pequeños cambios de velocidad alrededor de la frecuencia de resonancia. Lejos de la zona de resonancia, no existe cambio de fase.
- Existe también grandes cambios de la amplitud de la vibración alrededor de la zona de resonancia.
- Presencia de predominio de la frecuencia de 1X rpm, si se trata de una resonancia de tipo estructural, o presencia de la frecuencia de trabajo del elemento y multiplicados por la frecuencia de giro, si se trata de un problema de resonancia inducida, como es el caso del número de alabes de un ventilador multiplicado por la frecuencia de giro.

4.5 Falta de apriete en elementos de unión

Las diferentes formas de manifestarse la falta de apriete en elementos de unión tiene lugar como resultado del deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que han excedido las tolerancias de holgura o sencillamente se han aflojado debido a la dinámica de la operación de la máquina. La vibración que caracteriza, en general, a la falta de apriete en elementos de unión, la produce las fuerzas de excitación generadas por otros problemas tales como el desbalance, desalineamiento, excentricidad, problemas en los rodamientos, entre otros.

Este problema se clasifica en tres categorías, A, B y C, cada una con su espectro de vibración característico así como el comportamiento en el análisis de fase.

4.5.1 Tipo A

Es una soltura de la máquina respecto con su base, causada por el debilitamiento estructural de las patas de amarre de la máquina, la placa base, o por una cimentación deteriorada. Para esta clase de problema, la frecuencia que predomina es la frecuencia de giro de la máquina, 1X, y normalmente tiende a presentar una mayor amplitud en la dirección vertical. Un problema de soltura mecánica tipo A, fácilmente puede confundirse con un problema de desbalanceo. La técnica para diferenciarlo en primera instancia es la prueba de fase.

4.5.2 Tipo B

El tipo B es debido a los elementos de amarre, grietas en la estructura o en los asientos de los rodamientos, algunas veces inducidas por diferencias de las longitudes de las patas de amarre, aflojamiento de los tornillos de amarre de la máquina, aumento en la holgura de los cojinetes de apoyo, o por la presencia de una grieta o fisura en el equipo o en la base de apoyo.

Este tipo de soltura genera vibración a una frecuencia igual al doble de la velocidad de giro de la máquina, 2X.

4.5.3 Tipo C

Por último el tipo C es consecuencia de un ajuste inadecuado entre las partes de los elementos y normalmente provoca la excitación de varias frecuencias armónicas de la velocidad de giro del eje (0,5X, 1X, 1,5X, 2X, 2,5X, 3X, etc.).

4.6 Roce del rotor

Cuando las partes que giran de una máquina entran en contacto con las partes estacionarias se produce un efecto de fricción. Este tipo de fallo produce un espectro similar al de la soltura mecánica tipo C, sin embargo cuando se produce el roce de un elemento rotativo de la máquina, predominará la frecuencia 1X ya que el mismo roce produce un desbalanceo.

5 PRINCIPIOS DE ANÁLISIS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

La mayor parte del análisis de máquinas giratorias se basa en la investigación de las vibraciones durante un barrido de velocidad, en el que la máquina pasa de una RPM baja a una alta (revoluciones por minuto) o de una RPM alta a una RPM baja. Los datos de tiempo medidos durante el barrido de velocidad se dividen en segmentos más pequeños, cada uno de los cuales es procesado para encontrar el espectro. Es evidente que aquí estamos hablando de un caso especial de señales no estacionarias, ya que el contenido de frecuencia de la señal está cambiando. Por lo tanto, es importante comprender algunas propiedades fundamentales de este tipo de señales.

Primero, necesitamos tener un modelo del tipo de señales encontradas. La suposición hecha en el análisis de máquinas giratorias es generalmente que la señal comprende una serie de tonos senos con alguna frecuencia instantánea que cambia con el tiempo, con cada tono senoidal que tiene una amplitud que varía en el tiempo (y por lo tanto el nivel RMS). Así podemos formular la señal como:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N_0} A_n(t) \cos(\omega_n(t)t + \phi_n) \quad (5-1)$$

, donde $A_n(t)$ es una amplitud variable en el tiempo del componente de orden n -ésimo, $\omega_n(t)$ es la frecuencia angular de la misma componente, ϕ_n es el desfase de ángulo de fase del tono, y N_0 es el número de componentes relacionados con el orden en la señal.

El concepto de frecuencia instantánea se puede entender observando que para un tono seno estacionario, con amplitud y frecuencia constantes, tenemos:

$$x(t) = A \cos(\omega t) = A \cos(\Phi(t)) \quad (5-2)$$

De la Ecuación (5-2) se puede deducir que la frecuencia angular (constante) es:

$$\omega = \frac{d}{dt}(\omega t) = \frac{d}{dt}(\Phi(t)) \quad (5-3)$$

A partir de esto parece razonable definir la frecuencia instantánea (angular) de cualquier señal

$$x(t) = A \cos(\omega t) \quad (5-4)$$

, por la expresión

$$\omega_i(t) = \frac{d}{dt}(\Phi(t)) \quad (5-5)$$

, donde hemos usado el índice i en ω_i para indicar 'instantáneo'.

5.1 Análisis tiempo-frecuencia

Cuando estamos analizando una señal que varía en el tiempo, existe un problema intrínseco relacionado con el producto de ancho de banda-tiempo, producto BT .

El producto BT se denomina producto ancho de banda-tiempo (bandwidth– time product), donde B es el

ancho de banda de la señal y T es el tiempo de medición, es decir, $T = N\Delta T$, siendo N el número de muestras tomadas. Este producto es fundamental a la hora de calcular el espectro de una señal.

La frecuencia instantánea no se puede estimar instantáneamente, ya que necesitamos medir la señal durante algún tiempo para poder calcular un espectro. Además, la resolución de frecuencia que obtenemos usando un tiempo de medición particular, está inversamente relacionada con el tiempo de medición. Por lo tanto, a medida que elegimos una resolución de frecuencia más fina, obtenemos una resolución de tiempo más pobre, y viceversa. Esto resulta en una ambigüedad cuando estamos analizando las señales mediante barrido de velocidad y es muy importante entender esta limitación.

Para ilustrar la limitación del producto BT , en la Figura 5-1 se muestran dos espectrogramas de una señal de micrófono grabada durante un barrido de aproximadamente 1000 a 6700 RPM con dos tamaños de bloques FFT diferentes. Un espectrograma es una gráfica de un número de espectros con un cierto tamaño de bloques en función del tiempo. En el lado izquierdo, en la Figura 5-1(a), la resolución de frecuencia es gruesa y la resolución en el tiempo es fina, mientras que en el espectrograma de la derecha de la Figura 5-1(b) se muestra la situación opuesta. Comparando los dos espectrogramas es obvio cómo el cambio en la resolución de tiempo-frecuencia afecta el resultado.

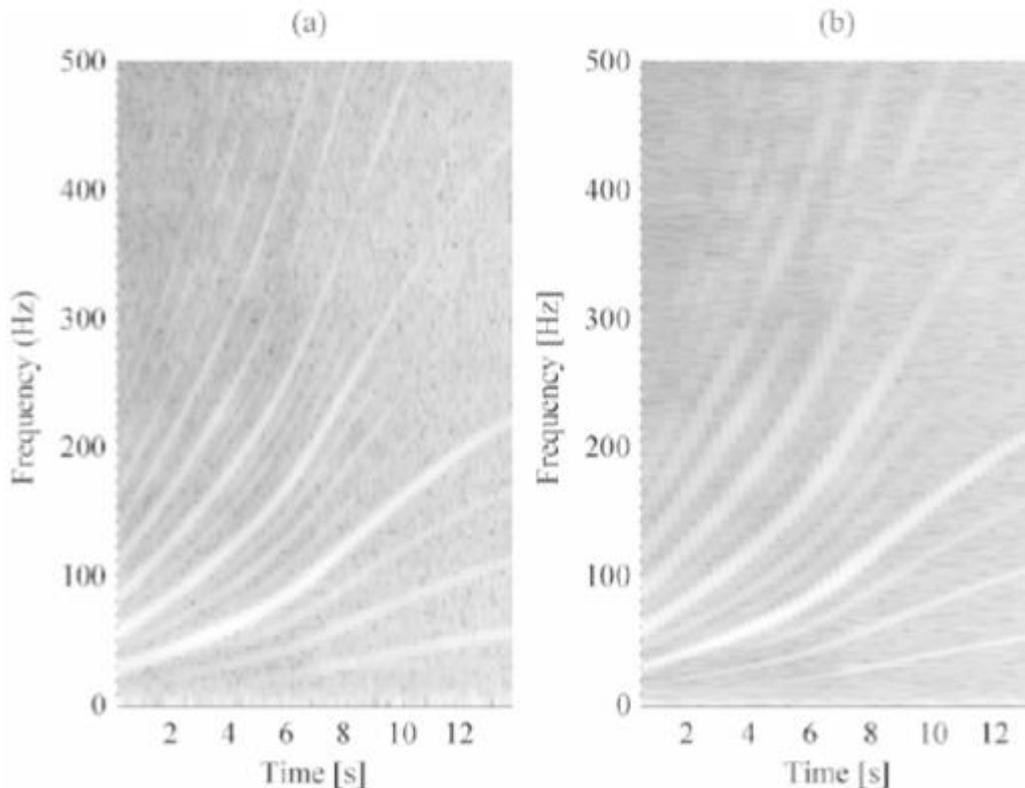


Figura 5-1. Espectrogramas que ilustran la limitación del producto BT . (a) Se incrementa la frecuencia 4Hz aproximadamente. (b) Se incrementa la frecuencia 1Hz aproximadamente.

Como consecuencia de las limitaciones de tiempo-frecuencia, debe tenerse en cuenta que, a partir de cualquier análisis tiempo-frecuencia, no existe una respuesta verdadera a la pregunta de cuál es el contenido del espectro de una señal que varía en el tiempo, depende de cómo es observado. En la mayoría de los casos de análisis de barrido de velocidad, la velocidad de barrido debe mantenerse bastante lenta, de modo que los cambios en la amplitud de los órdenes no se producen demasiado rápido. En muchos casos es una buena idea estandarizar algunos parámetros de experimentos y análisis, tales como la resolución de frecuencia y velocidad de barrido de velocidad, para facilitar las comparaciones entre diferentes mediciones.

5.2 Señales de velocidad de rotación. Señal de tacómetro.

En la mayoría de los casos de análisis de maquinaria rotativa, un transductor de velocidad de rotación, un tacómetro, está conectado a la máquina giratoria para medir las RPM. Dicho transductor es usualmente óptico o inductivo.



Figura 5-2. Tacómetro óptico.



Figura 5-3. Tacómetro magnético.

En cualquier caso, produce alguna forma de señal de impulso en la que el tiempo entre los impulsos está relacionado con la velocidad de rotación, $v_r(t)$, expresada en rotaciones por minuto (RPM) como

$$v_r(t) = \frac{60}{N_p(t_2 - t_1)} \quad (5-6)$$

, donde N_p es el número de pulsos por revolución, y t_1 y t_2 son las instancias de tiempo de dos pulsos.

Las lecturas estimadas de RPM son muy importantes para el análisis de maquinaria rotativa, como veremos más adelante en este capítulo. Muchos sistemas de análisis de FFT diseñados para el análisis de maquinaria giratoria tienen por lo tanto funcionalidad para asegurar que la medición de la velocidad de rotación es exacta. Por ejemplo, a menudo se incluye el filtrado de paso bajo para eliminar las perturbaciones de alta frecuencia, promediar para disminuir el error al azar y limitar el cambio en la estimación de $v_r(n)$ entre n cercanas (limitación de la velocidad de desplazamiento).

La RPM en función del tiempo puede calcularse con bastante facilidad a partir de una medición de la señal del tacógrafo. Por lo general, la señal tacométrica se graba en un canal de medición simultáneamente con las señales de acelerómetro y / o micrófono, de modo que la señal tacométrica se muestre de forma sincronizada con las señales a analizar.

La manera más fiable de mejorar la precisión del perfil RPM-tiempo, sin embargo, es muestrear la señal del tacho con una frecuencia de muestreo más alta, reduciendo así la incertidumbre. Algunos sistemas comerciales para señales de ruido y vibración, por lo tanto, incluyen canales especiales de entrada de tacómetro con esta función.

5.3 Mapas RPM

El procedimiento de análisis típico en el análisis de maquinaria giratoria consiste en realizar un arranque o parada de la máquina o del motor, durante el cual se registran las señales temporales o se analizan en tiempo real. Una carrera es cuando la velocidad de rotación de la máquina o el motor se incrementa de un RPM bajo a un RPM alto, por ejemplo de 800 a 5500 RPM de un motor de automóvil. En algunas máquinas, como por ejemplo los generadores eléctricos, no se pueden barrer con facilidad las RPM, debiéndose en la mayoría de los casos a que esas máquinas están diseñadas para operar a una RPM constante (relacionada con la frecuencia de la línea eléctrica). En tales casos, es común apagar el accionamiento de la máquina y medir las vibraciones durante la parada de la máquina. Otro ejemplo en el que a menudo se miden las RPM durante la parada, es en el análisis de la caja de cambios.

En el análisis de la señal de tiempo medida desde la fase de carrera o de parada, la señal de tiempo se divide típicamente en segmentos cortos, para cada uno de los cuales se calcula un espectro instantáneo, a veces

denominado Transformada de Fourier de corta duración o STFT. Cada uno de estos espectros es colocado en el respectivo valor de RPM durante el segmento de tiempo correspondiente, tomando la RPM media del perfil RPM-tiempo, o en algunos casos tomando la RPM al final del bloque de tiempo. El conjunto de espectros así producido se refiere a menudo como un "mapa de RPM" que se puede trazar en varios formatos.

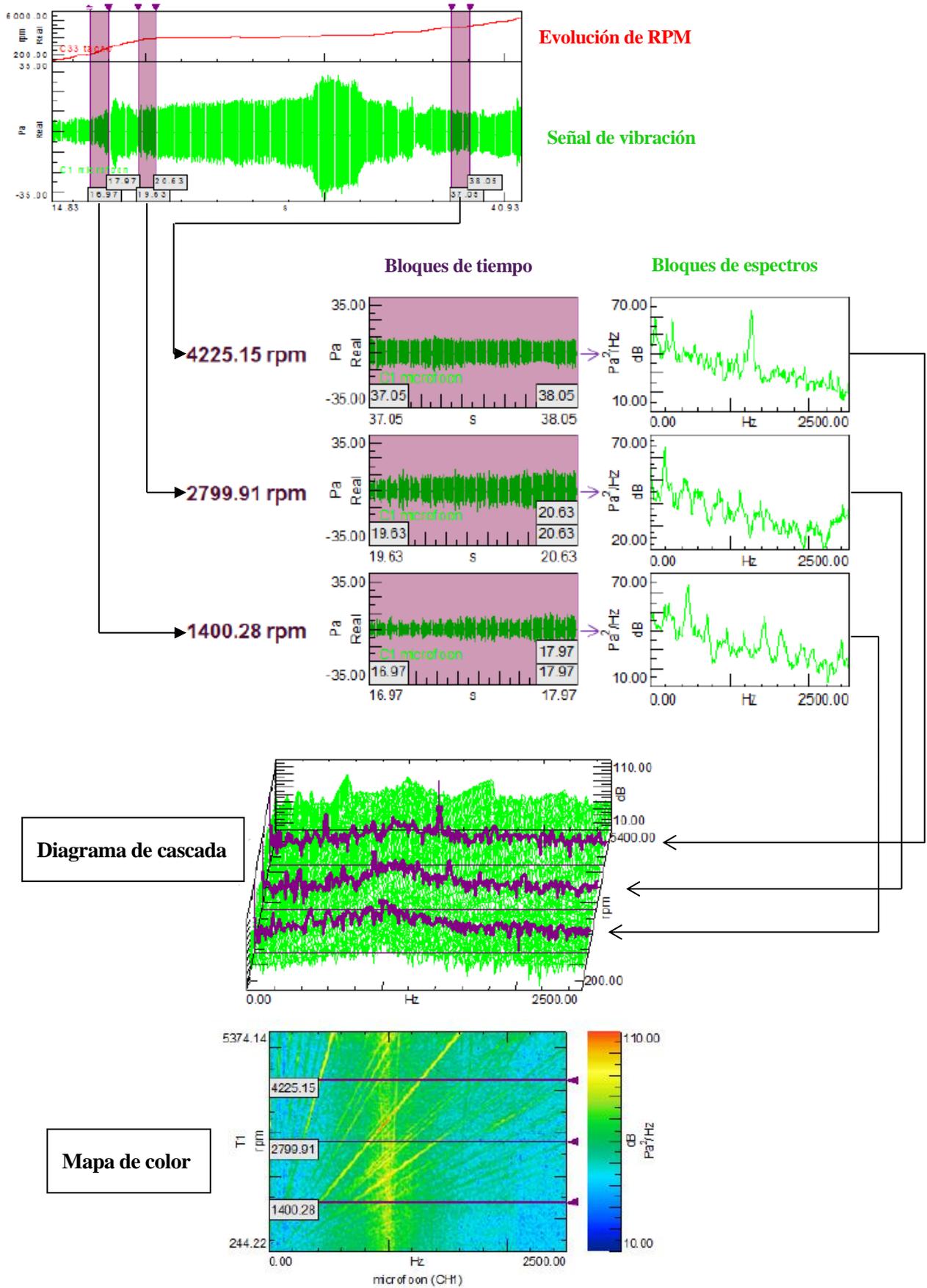


Figura 5-4. Principio de análisis de las máquinas rotativas.

5.3.1 Diagrama de cascada

Una forma común de trazar mapas RPM es el diagrama de cascada. Se trata de un diagrama tridimensional con frecuencia en el eje x , amplitud RMS en el eje y y velocidad de rotación en el eje z . En este tipo de gráfico, los componentes del espectro relacionados con los órdenes, que se producen en lugares proporcionales a la velocidad de rotación, serán visibles como picos en una línea recta, y las resonancias estructurales a menudo serán visibles como picos a frecuencias fijas. En el diagrama se puede ver cuáles son los picos más altos, a qué velocidad se produce el máximo, y si son causados por resonancias o fenómenos dependientes de la velocidad de rotación. La Figura 5-5 muestra un diagrama de cascada. Se pueden apreciar claramente los órdenes uno, dos, tres, sin embargo, el pico más alto en esta señal de vibración está siguiendo el orden uno.

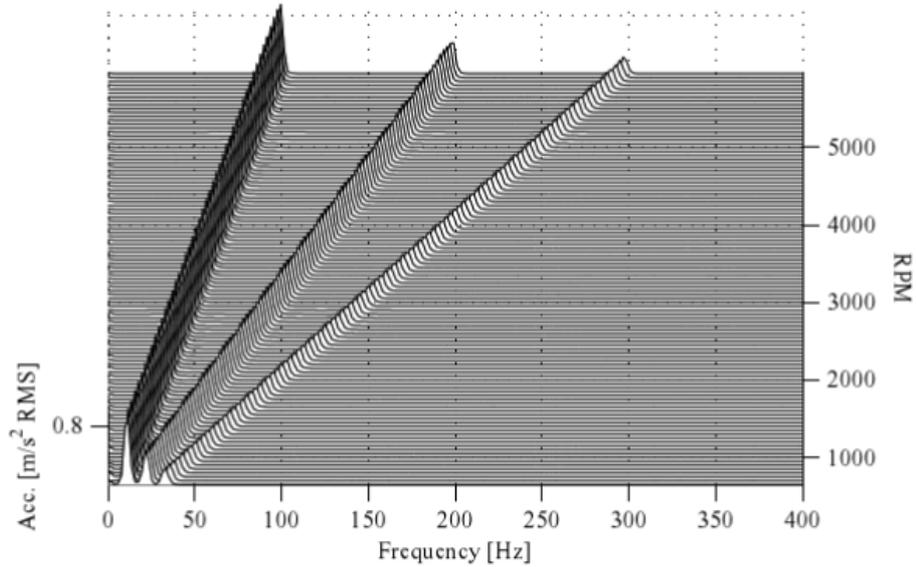


Figura 5-5. Ejemplo de diagrama de cascada.

5.3.2 Mapa de color

Una desventaja del diagrama de cascada es que a veces los picos más pequeños pueden ser difíciles de distinguir. Una alternativa al diagrama de cascada es el mapa del color. Un ejemplo de este tipo de trama se muestra en la Figura 5-6. En el diagrama de mapa de color, a menudo puede ser más fácil diferenciar los picos, especialmente cuando un orden cumple una frecuencia de resonancia. Una manera común de obtener más detalles en el mapa de color es representar el logaritmo de las RPM en vez de las RPM, lo que mejora los picos más bajos.

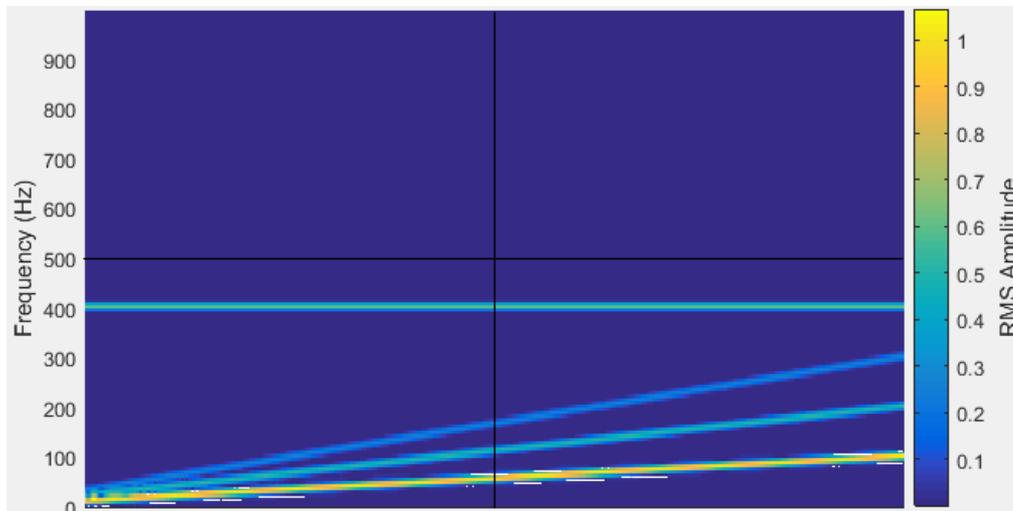


Figura 5-6. Ejemplo de mapa de color.

5.4 Fenómeno de manchas ('Smearing')

Smearing es un efecto de la DFT que ocurre si la frecuencia de la señal está cambiando durante la duración del bloque de tiempo. Como se vio anteriormente, las señales encontradas en el análisis de máquinas rotativas no son estacionarias. Por lo tanto, el espectro de la señal no es constante durante el periodo de tiempo medido, lo que viola la suposición de la DFT. Una suposición hecha en el análisis de máquinas rotativas es que el cambio de frecuencia para un tono que estamos estudiando es pequeño durante la adquisición del bloque de datos utilizado para cada FFT.

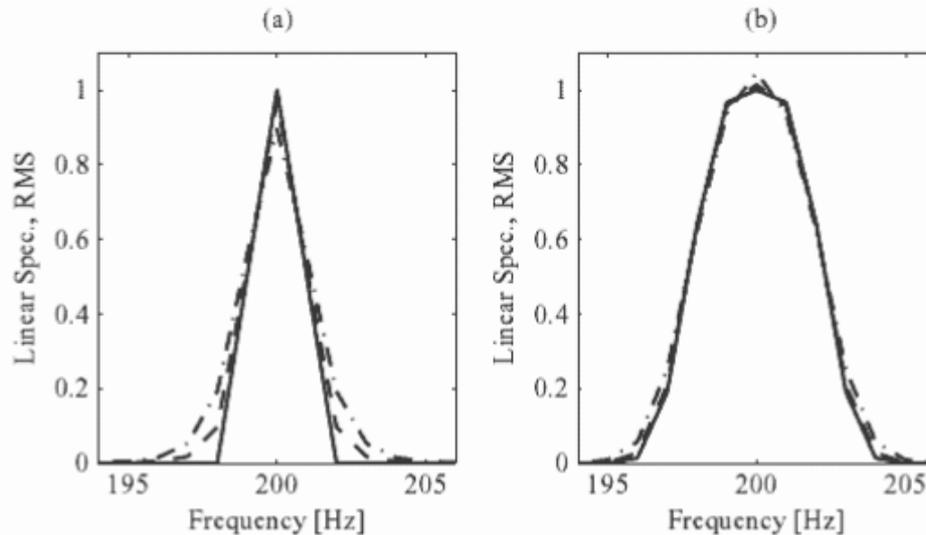


Figura 5-7 . Efecto de manchas.

El análisis del efecto de manchas muestra que es dependiente de la ventana de tiempo utilizada y del cambio de frecuencia durante el bloque de tiempo, relativo al incremento de frecuencia, Δf . Para ilustrar el efecto de difuminado, en la Figura 5-7(a), se muestra el resultado de un cálculo del espectro usando una ventana de Hanning, en una senoide barrida linealmente hacia arriba en frecuencia. En la figura se muestran tres espectros, sin cambio de frecuencia (línea continua), y un cambio de frecuencia de $2\Delta f$ (línea de trazos) y $4\Delta f$ (línea de trazos y puntos). Como se puede ver, el efecto de manchas hace que el pico disminuya, mientras que los receptáculos de frecuencia en ambos lados del pico aumentan.

Una ventana mejor para usar para este tipo de análisis podría ser la ventana plana, que a menudo se recomienda para señales periódicas. En la Figura 5-7(b) se representa el espectro de la misma señal que en la Figura 5-7(a), pero con una ventana plana en lugar de la ventana de Hanning. Se puede ver que la ventana plana tiene el efecto peculiar de que las manchas provocan un pico que es más alto que el valor real. Como es evidente a partir de la gráfica, el error es menor que para la ventana Hanning debido a la mayor anchura del lóbulo principal de la ventana plana. Sin embargo, la sobreestimación del nivel de RMS es, en la mayoría de los casos, un efecto no deseado. Como se verá a continuación, también podemos reducir considerablemente el error utilizando un enfoque de estimación diferente.

Hay una tercera alternativa, que es usar una ventana de Hanning y la suma de cinco valores de frecuencia alrededor del pico para obtener el nivel RMS. Resulta que esta alternativa es mucho mejor. Como consecuencia, el nivel de RMS calculado en toda la gama de frecuencias será siempre idéntico al nivel "verdadero" RMS calculado en el dominio del tiempo. También en un rango de frecuencia más estrecho alrededor de un único componente espectral, el nivel RMS sumado está muy cerca del verdadero valor RMS. En la Figura 5-8 se representan los resultados de la utilización de este método en comparación a los que se obtendrían de tomar el pico del espectro con Hanning, ventanas planas y rectangulares. Es interesante notar que la ventana plana produce un pequeño error positivo, que puede explicarse probablemente por la forma inusual de la ventana plana en el dominio de la frecuencia. Otras ventanas, como la rectangular (uniforme) y la ventana Hanning dan lugar a errores negativos.

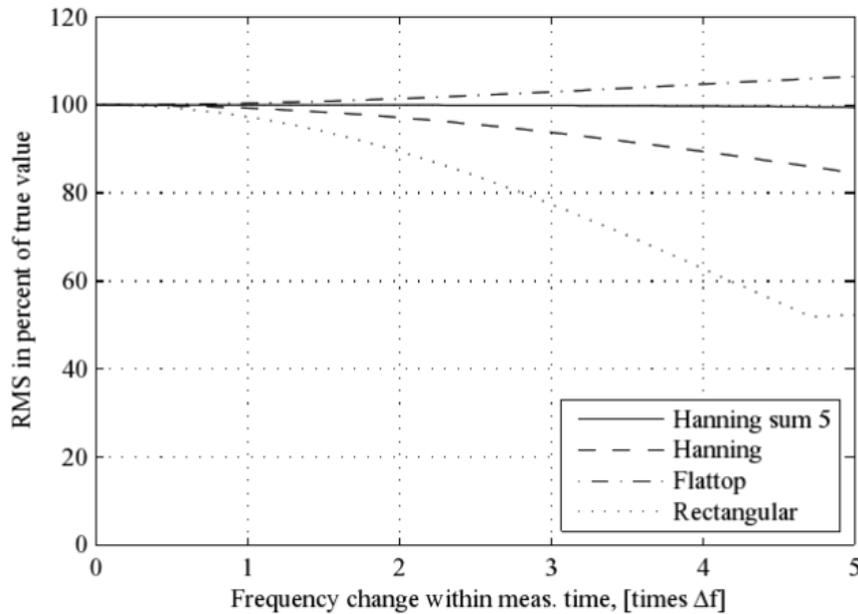


Figura 5-8. Efecto de manchas con diferentes ventanas.

Como se puede ver en la Figura 5-8, el error en el nivel RMS es insignificante cuando se utiliza la suma de frecuencias con la ventana Hanning, en comparación con el uso de cualquiera de las ventanas. Es por ello que es el método preferido para el análisis con frecuencia de muestreo fija.

5.5 Seguimiento de órdenes (Order tracking)

El seguimiento de órdenes no es más que realizar un análisis en el tiempo, o con las RPM, de la evolución del nivel RMS de ciertos órdenes, es decir, se extrae un nivel RMS de un orden en particular, y se compara con las RPM o con el tiempo. Este análisis permite interpretar cómo diferentes componentes dependientes de la velocidad de rotación contribuyen a los niveles de vibración o sonido.

A menudo se utilizan unos diagramas bidimensionales llamados “order tracks”. Estos diagramas se calculan a partir del mapa RPM, discutido en el Apartado 5.3, mediante la extracción de información sobre el valor RMS de un componente de orden frente al RPM. En la Figura 5-9 se muestra una ilustración principal del proceso de generación de un diagrama “order tracks” así como de mapas RPM.

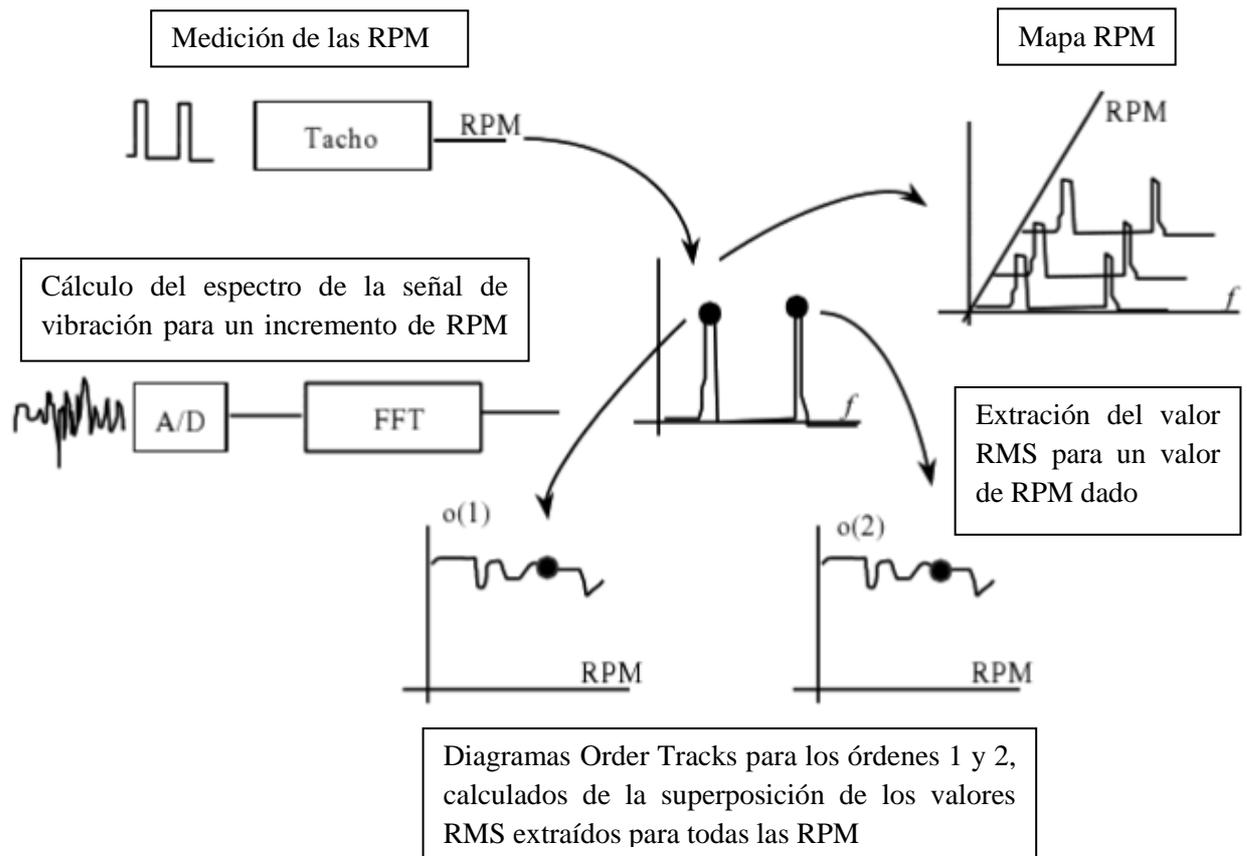


Figura 5-9. Ilustración del principio de los diagramas Order Tracks.

6 TEORÍA DEL ANÁLISIS DE ÓRDENES

6.1 Relaciones fundamentales de los DSP para máquinas rotativas

Un procesador digital de señales o DSP, es un sistema digital que se utiliza para procesar y representar señales analógicas en tiempo real. Este sistema recibe muestras de un convertidor analógico/digital, posteriormente se realiza un procesamiento digital en el módulo DSP, para después volverse a convertir en analógico y dar paso a la salida. De esta manera se pasa de una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia. En la Figura 6-1 se muestran los parámetros básicos que utiliza el procesador.

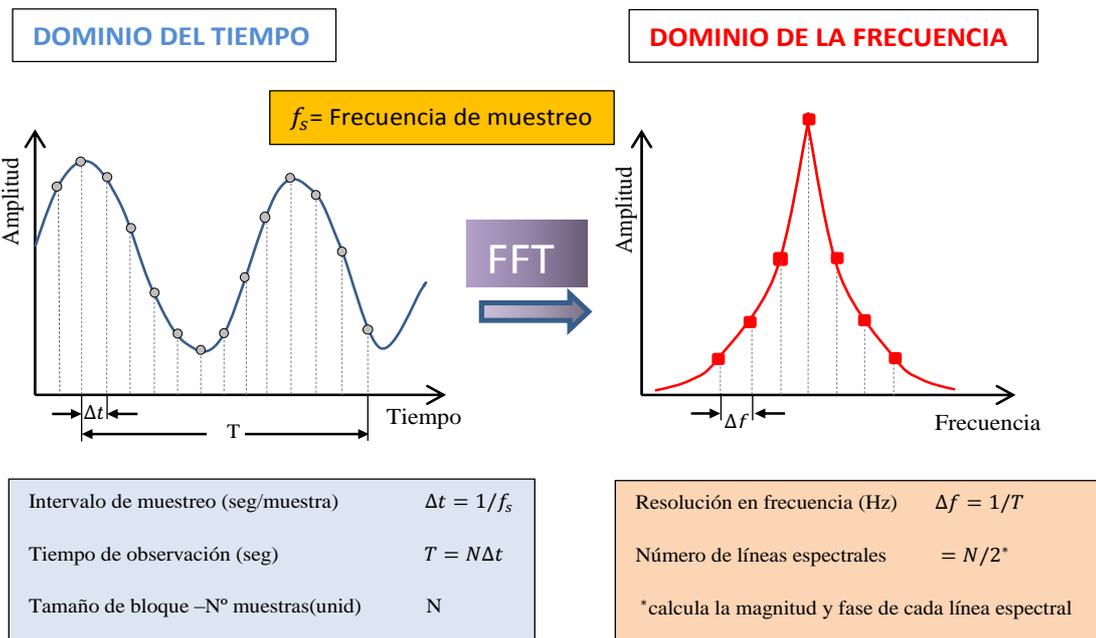


Figura 6-1. Parámetros básicos de un Procesador digital de señal.

Además de la Figura 6-2, se pueden extraer los siguientes parámetros fundamentales que relacionan el procesador digital de señal (DSP) con la máquina rotativa.

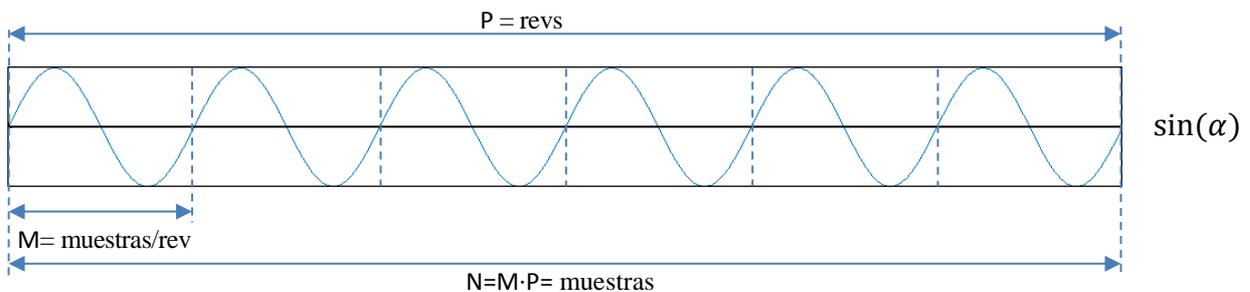


Figura 6-2. Muestreo de la señal.

Se conoce como tamaño de adquisición de datos, al número de muestras por bloque tomadas, N , dado por:

$$N = M \cdot P \quad (6-1)$$

El número de muestras adquiridas por revolución se designa con la letra M y depende del orden máximo según la expresión (6-2).

$$M = \frac{f_s \cdot 60}{RPM} = 2 \cdot O_{max} \quad (6-2)$$

Por último se tiene parámetro P , que es el número de revoluciones por bloque y se obtiene de la ecuación (6-3)

$$P = T \cdot \frac{RPM}{60} = \frac{RPM}{\Delta f \cdot 60} = \frac{1}{\Delta O} \quad (6-3)$$

6.2 Análisis de órdenes mediante muestreo fijo

El método más básico utilizado para el análisis de órdenes es utilizar una frecuencia de muestreo fija, F_s para adquirir la señal de vibración. La frecuencia de muestreo es por tanto independiente de las revoluciones y viene determinada por la frecuencia máxima (Ecuación (6-4))

$$f_s = 2 \times F_{max} \quad (6-4)$$

De la ecuación (6-2) se puede extraer que la frecuencia de muestreo está directamente relacionada con el orden máximo.

Uniendo la ecuación (6-4) y (6-2) podemos sacar la expresión (6-5) o equivalentemente la (6-6)

$$f = O \cdot \frac{RPM}{60} \quad (revs/min) \quad (6-5)$$

$$\Delta f = \Delta O \cdot \frac{RPM}{60} = \frac{1}{P} \quad (6-6)$$

, siendo ΔO la resolución en órdenes, e Δf resolución en frecuencia.

Si se toman máximos en la ecuación (6-5), se llega a que

$$f_{max} = O_{max} \cdot \frac{RPM}{60} = \frac{f_s}{2} \quad (6-7)$$

$$O_{max} = \frac{f_s \cdot 60}{2 \cdot RPM_{max}} = \frac{M}{2} \quad (6-8)$$

, es decir, el orden máximo global viene determinado por la RPM máxima o lo que es igual a decir que el orden máximo depende del número de muestras por revolución.

El análisis de órdenes con frecuencia de muestreo fija da una visión global diferenciando entre armónicos y resonancias. Como ya se comentó el orden en un múltiplo entero de la velocidad de rotación del eje al cual se generan grandes vibraciones. A diferencia de la Resonancia, que ocurre a una frecuencia constante, el orden va cambiando su frecuencia al variar las RPM. Como consecuencia, el orden se visualizará en los mapas RPM como una línea oblicua, mientras que la resonancia será una línea a frecuencia constante.

Sin embargo, este tipo de análisis produce manchas en los componentes espectrales dependientes de RPM, es decir, los órdenes. Pero por otro lado, los componentes espectrales que no cambian con la frecuencia, como pueden ser los picos de resonancia, se resuelven bien con esta técnica. Por lo tanto, un mapa RPM a partir de una medición con frecuencia de muestreo fija es a menudo un primer paso adecuado en un esquema de resolución de problemas, con el fin de investigar si un problema de vibración es causado por componentes de frecuencia relacionados con los órdenes o resonancias.

6.3 Análisis de órdenes mediante muestreo síncrono

Con el fin de evitar el efecto de manchado discutido anteriormente y mejorar la resolución de componentes de frecuencia relacionados con el orden, se puede usar el denominado muestreo síncrono en lugar de muestrear los datos con frecuencia de muestreo fija como se ha supuesto hasta ahora.

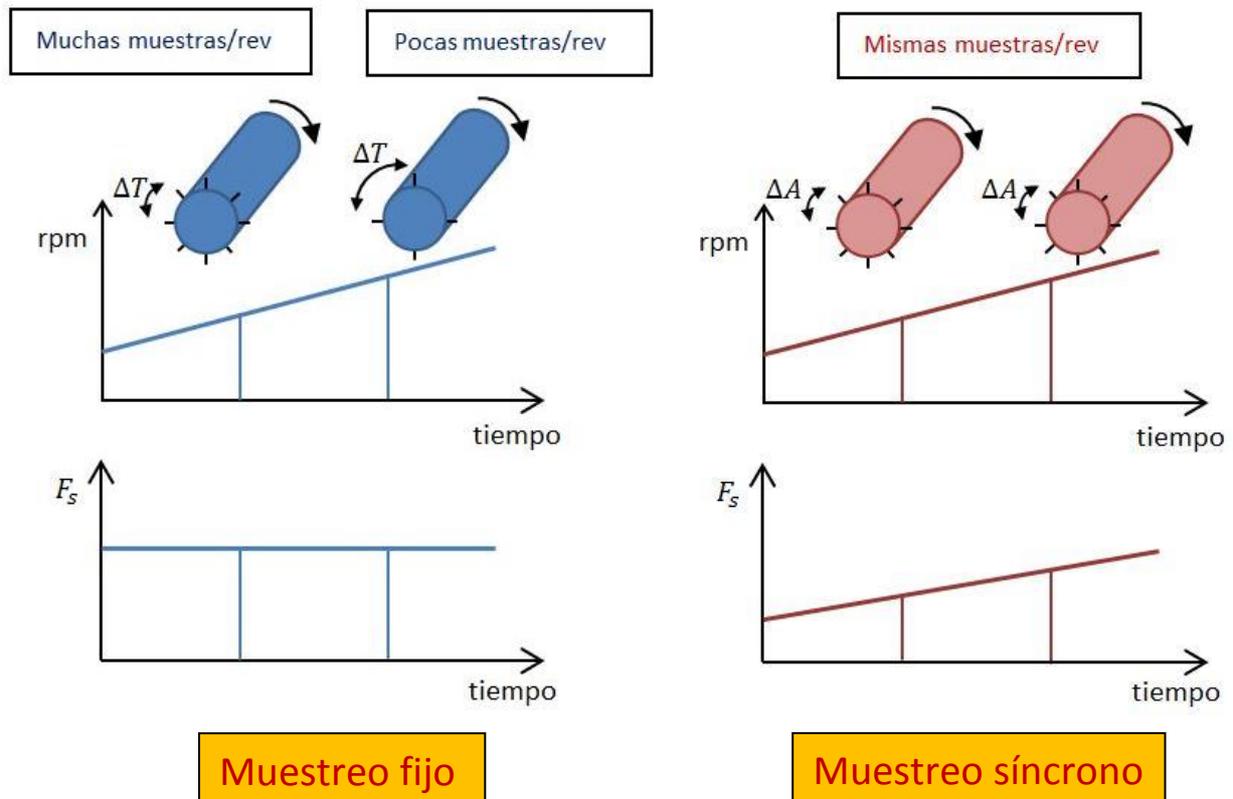


Figura 6-3. Fundamentos básicos del Muestreo fijo vs. Muestreo síncrono.

El objetivo del muestreo síncrono es muestrear la señal de vibración o ruido en ángulos iguales a lo largo de cada ciclo (una revolución es un ciclo), en lugar de equidistante en el tiempo. El "eje de frecuencia" resultado de la FFT, ahora se escala físicamente en órdenes (es decir, múltiplos de las rpm). El orden n corresponde a un evento que tiene lugar n veces por revolución. También se conoce como remuestreo adaptativo, ya que f_s se va adaptando a las RPM, Ecuación (6-9).

$$f_s = 2 \cdot f_{max} = \frac{2 \cdot O_{max} \cdot RPM}{60} \quad (6-9)$$

La resolución en órdenes va a ser constante y fijada por la Ecuación (6-6).

Con este método se obtienen el mismo número de muestras en cada revolución, Ecuación (6-2). Las muestras después del muestreo síncrono se dice generalmente que están en el dominio del orden, o dominio del ángulo. Con, por ejemplo, 16 muestras por revolución del motor (o eje), se obtendrá una señal que es periódica con una longitud de periodo constante, si el eje x se escala en ciclos.

La DFT de esta señal, a su vez, tendrá picos en las posiciones correspondientes a los armónicos de este ciclo básico (una rotación del motor), que son exactamente los órdenes o fracciones de ellos.

Una desventaja de la utilización de muestreo síncrono seguido de una transformación de frecuencia basada en DFT, es la resolución de orden resultante está limitada. Esto está de nuevo relacionado con el producto BT de la DFT (Véase la Sección 5.1), que en el "dominio de orden" se convierte en un producto de resolución de orden y número de ciclos. Para tener una resolución de orden alto, la longitud de bloque de la DFT tiene que ser alta, lo que significa que hay que medir muchos ciclos, reduciendo así la resolución RPM.

Con el fin de mejorar la exactitud del "order tracking", especialmente con los run-ups muy rápidos, Vold desarrolló un método de filtrado llamado VoldKalman, ver Sección 6.4.

6.4 Métodos paramétricos

Todos los métodos hasta ahora descritos en este capítulo han sido métodos no paramétricos, es decir, métodos que no utilizan información a priori sobre las señales. La ventaja de los métodos no paramétricos es que dan resultados confiables sin la necesidad de ninguna suposición sobre los datos. Los órdenes seguidos por los métodos descritos hasta ahora en este capítulo pueden ser ligeramente incorrectos, debido a restricciones del producto ancho de banda-tiempo, o porque el remuestreo síncrono falla debido, por ejemplo, a errores de tacómetro. Se han sugerido algunos métodos paramétricos, por ejemplo el método de Prony para el seguimiento de órdenes. Sin embargo, ha habido poco éxito usando tales métodos, lo cual es probablemente debido al hecho de que los modelos subyacentes a las señales de vibración no son fáciles de definir. Casi siempre hay segmentos erróneos en la señal de vibración debido al hecho de que cualquier máquina es más complicada de lo que cualquier modelo razonable puede incluir. Por lo tanto, este tipo de métodos paramétricos suele fallar en los datos de ruido y vibración.

Más recientemente, sin embargo, se ha desarrollado un método paramétrico que es menos propenso a errores de la hipótesis del modelo, usualmente denominado como el método de filtro de Vold-Kalman. Este método utiliza filtros de paso de banda adaptativos cuyas frecuencias centrales están controladas por la estimación instantánea de RPM-tiempo a partir de una medición de la señal del tacógrafo. La salida del método de Vold-Kalman es, por lo tanto, una nueva señal de tiempo, filtrada alrededor de un orden particular. Esta señal de tiempo se puede analizar mediante un cálculo de la amplitud RMS o algún detector de envolvente para extraer un orden como una función de RPM, que es un principio de los filtros de segunda generación.

Los filtros Vold-Kalman ofrecen varias ventajas sobre el "order tracking" tradicional. La más útil de ellas es que puede usarse para múltiples señales RPM con órdenes que se cruzan. El primero de estos puntos es muy atractivo en aplicaciones de calidad de sonido, donde el método de Vold-Kalman ofrece la posibilidad de escuchar una suma de los componentes relacionados con el orden, por ejemplo, del ruido de un motor. El segundo punto es muy importante en muchas aplicaciones, por ejemplo, en cajas de cambios automáticas y en turbinas, donde típicamente varias velocidades de rotación independientes están causando órdenes, relacionados con los diferentes ejes giratorios, que se cruzan. Con los filtros Vold-Kalman, estos órdenes cruzados pueden dividirse en órdenes independientes.

Sin embargo, la técnica de Vold-Kalman está todavía limitada por el producto BT ya que un filtro con ancho de banda menor no pueden reaccionar a cambios rápidos en el nivel RMS en un orden, provocando una señal de salida que varía más lentamente, y viceversa. Por tanto, es difícil para un usuario sin experiencia seleccionar un ancho de banda adecuado, y de hecho esto es imposible sin un conocimiento a priori de los datos. Una segunda ventaja del filtro de Vold-Kalman es que, puesto que produce señales de tiempo, estas señales de tiempo pueden ser escuchadas o, por ejemplo, sustraídas del ruido total del motor para evaluar los tonos relacionados con la orden. Desafortunadamente, es evidente que los filtros de Vold-Kalman también presentan algunas desventajas sobre los métodos basados en DFT robustos y bastante fáciles. Una es la carga computacional que, por supuesto, se superará a su debido tiempo con el aumento de la velocidad de los ordenadores. Otro problema es la experiencia necesaria para interpretar correctamente los resultados.

7 APLICACIÓN TEÓRICA-PRÁCTICA

7.1 Ejemplo 1.

Generar una señal simulada del run-up de un motor que aumenta de 600 a 6000 RPM en 30 segundos. La señal debe contener:

- El armónico fundamental, orden 1, con un nivel de RMS de 1.
- Los dos primeros armónicos (orden 2 y 3), con niveles constantes de RMS de 0.5 y 0.25, respectivamente.
- Una resonancia a la frecuencia 400 Hz, con un nivel de RMS constante de 0.6

Nótese que 600-6000 RPM se corresponde con una frecuencia de giro de 10-100 Hz. Este código genera una señal de tacómetro, en la variable `tacho`, y una señal con órdenes 1,2 y 3 además de una resonancia en la variable `x`.

7.1.1 Código Matlab

```
% 1. Generar una señal simulada del run-up de un motor que aumenta en RPM
de 600 --> 6000 RPM en 30 segundos (600rpm=10Hz; 6000rpm=100Hz).
% La señal debe contener:
% -El armónico fundamental: Con un nivel de RMS de 1- Orden 1.
% -Los dos primeros armónicos: Con nivel de RMS de 0.5 - Orden 2
%                               Con nivel de RMS de 0.25- Orden 3
%
clc; clear all, close all,
fs = 2000;           % Frecuencia de muestreo
T = 30;             % Duración de tiempo
f0 = 10;            % Frecuencia inicial
f1 = 100;           % Frecuencia final
fr = 400;           % Frecuencia de resonancia
t = (0:1/fs:T);    % Eje de tiempo
Sq2= sqrt(2);      % Amplitud fundamental

% Con la función CHIRP--> Y = chirp(T,F0,T1,F1) se van a generar muestras
% de una señal de barrido en frecuencia lineal en las instancias de tiempo
% definidas en la matriz T. La frecuencia instantánea en el tiempo 0,
% es F0 Hertz. La frecuencia instantánea F1 se alcanza en el instante T1.
x      = Sq2*chirp(t, f0, t(end), f1);           % Señal fundamental
tacho = x;                                       % Señal de tacómetro
x      = x+ 0.5 *Sq2*chirp(t, 2*f0, t(end), 2*f1); % Añade el orden 2
x      = x+ 0.25*Sq2*chirp(t, 3*f0, t(end), 3*f1); % Añade el orden 3
x      = x+ 0.6 *Sq2*chirp(t, fr, t(end), fr);   % Añade la resonancia
t1     = (0:1/fs:1);
plot(t1,x(1:length(t1))); grid                 % Representación trozo de x

% A continuación se usa la señal de tacho para calcular con la función
% 'tachorpm' las RPM instantáneas.
% RPM = tachorpm(X,Fs) extrae una señal RPM de un pulso de tacómetro.
% Extrae la señal de velocidad de rotación en el vector, RPM, de una señal
% de pulso de tacómetro, X, con una frecuencia de muestreo, Fs(Hz). El vector
% RPM tendrá el mismo número de elementos que X. Si no se especifica el
% número de pulsos por revolución, automáticamente selecciona 1.
rpm = tachorpm(tacho, fs);
```

```

%% 2. Análisis de órdenes

vib = x - mean(x); % se elimina la componente de continua de la señal

% Dibuja la velocidad de rotación del motor
subplot(2,1,1) %divide el espacio de la figura en una matrix MxN ejes,
siendo plot(M,N,P),y selecciona los ejes P para colocar el gráfico.
plot(t,rpm) % Plot the engine rotational speed
xlabel('Time (s)')
ylabel('Engine Speed (RPM)')
title('Engine speed')

%Dibuja la señal de vibración
subplot(2,1,2)
plot(t,vib) % Plot the vibration signal
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (mV)')
title('Accelerometer Vibration Data')

% Se genera y visualiza un mapa RPM con los datos de vibración.
% MAP = rpmfreqmap (X, Fs, RPM) realiza el análisis de frecuencia(STFT)en el
% vector de entrada X y devuelve una matriz de mapa de frecuencias, MAP con
% amplitudes de raíz media cuadrada (RMS).Por defecto se utiliza una ventana
% de Hanning. Las filas de MAP corresponden a las diferentes frecuencias, y
% las columnas corresponden a los diferentes valores de RPM en los que se
% calculó MAP. Fs es la tasa de muestreo de X en Hertz. X se mide a un
% conjunto de velocidades de rotación en revoluciones por minuto,
% especificadas en RPM vector.Si no se especifica la resolución se toma por
% defecto RES=fs/128
rpmfreqmap(vib,fs,rpm) % RES=fs/128 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,10) % RES=10 Hz

% Se genera un mapa de orden-rpm.
% MAP = rpmordermap (X, Fs, RPM, RES) realiza análisis de orden en el vector
% de entrada X y devuelve una matriz de mapa de orden, MAP con las
% amplitudes entrada X y devuelve una matriz de mapa de orden, MAP con las
% amplitudes de la raíz cuadrática media(RMS). Rpmordermap vuelve a
% muestrear X de la raíz cuadrática media(RMS). Rpmordermap vuelve a
% muestrear X con un número constante de muestras por velocidad de ciclo y
% analiza el contenido espectral de esta señal remuestreada utilizando
% transformadas de Fourier de corto tiempo (STFT). Las filas de MAP
% corresponden a los diferentes órdenes, y las columnas corresponden a los
% diferentes valores de RPM en los que se calculó MAP. Fs es la tasa de
% muestreo de X en Hertz. X se mide respecto a un conjunto de velocidades de
% rotación en revoluciones por minuto especificadas en el vector RPM. Si no
% se especifica RES, la resolución de orden predeterminada se ajusta a la
% velocidad de muestreo de la señal de entrada resampleada (es decir, una
% muestra de muestras constantes por señal de velocidad de ciclo) dividida
% por 256.

rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05) % RES=0.05 orden
[map,mapOrder,mapRPM,mapTime] = rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05);

```

```
% Cálculo del espectro medio versus orden para una señal de vibración.
% SPEC = ordenespectrum (X, Fs, RPM) calcula un vector de espectro medio,
% SPEC, para el vector de señal, X. X tiene una tasa de muestreo de Fs en
% Hz y se mide respecto a un conjunto de velocidades de rotación
% especificadas en el vector RPM. Por defecto, los valores de SPEC
% corresponden a las amplitudes de la raíz cuadrática media (RMS) dadas en
% escala lineal.

figure
    orderspectrum(map,mapOrder)
    [spec,specOrder] = orderspectrum(map,mapOrder); %specOrder contiene el
orden correspondiente a cada valor de espectro medio almacenado en spec.

% Encuentra los picos locales en el vector de datos.
% 'SortStr' especifica la dirección de clasificación de los picos,'ascend',
% 'descend' o 'none'. En dirección ascendente, los picos se clasifican de
% menor a mayor, en orden descendente, de mayor a menor, y sin dirección
% los órdenes se clasifican por orden de concurrencia.
% 'NPeaks' especifica el número máximo de picos a encontrar. Si no se
% especifica, se devuelven todos los picos.

[~,peakOrders] = findpeaks(spec,specOrder,'SortStr','descend','NPeaks',2);
peakOrders = round(peakOrders,3)

% ordertrack encuentra las amplitudes de los órdenes de pico como una
% función del tiempo.Va a devolver la amplitud RMS de los dos órdenes de
% pico.

figure
ordertrack(map,mapOrder,mapRPM,mapTime,peakOrders)
```

7.1.2 Resultados

Se representan la velocidad del motor y los datos de vibración como funciones del tiempo:

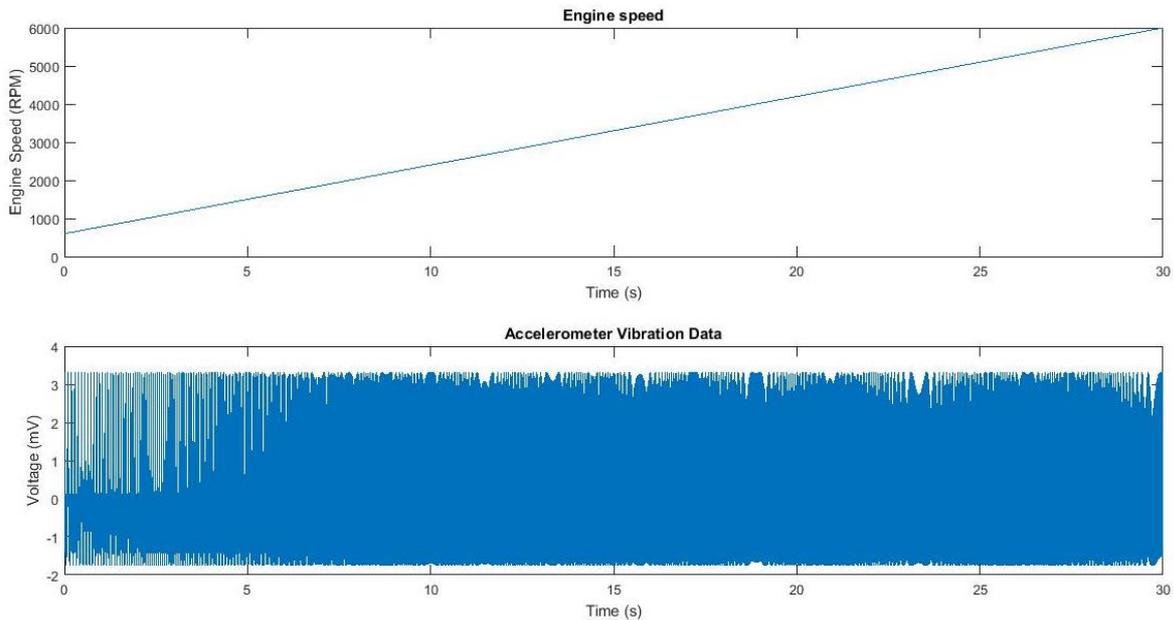


Figura 7-1. Superior, velocidad del motor medida en revoluciones por minuto. Inferior, señal de vibración en función del tiempo.

La velocidad del motor aumenta de forma lineal, siendo este tipo de perfil de RPM típico para analizar vibraciones en maquinaria rotativa. La amplitud de la vibración cambia en función de la velocidad de rotación, moviéndose entre un límite superior e inferior.

La señal de vibración puede ser visualizada en el dominio de la frecuencia usando la función `rpmfreqmap`. Esta función calcula la transformada de Fourier de corto tiempo de la señal y genera un mapa de frecuencias RPM. Esta función muestra el mapa en una ventana interactiva de trazado cuando se omiten argumentos de salida.

La ventana de la figura interactiva producida por `rpmfreqmap` contiene un mapa de frecuencias RPM, una curva RPM vs tiempo correspondiente al mapa y varios indicadores numéricos que pueden usarse para cuantificar componentes de vibración. La altura del mapa representa la amplitud de la raíz media cuadrada (RMS) por defecto. Otras opciones de amplitud, incluyendo amplitud de pico y potencia, se pueden especificar con argumentos opcionales.

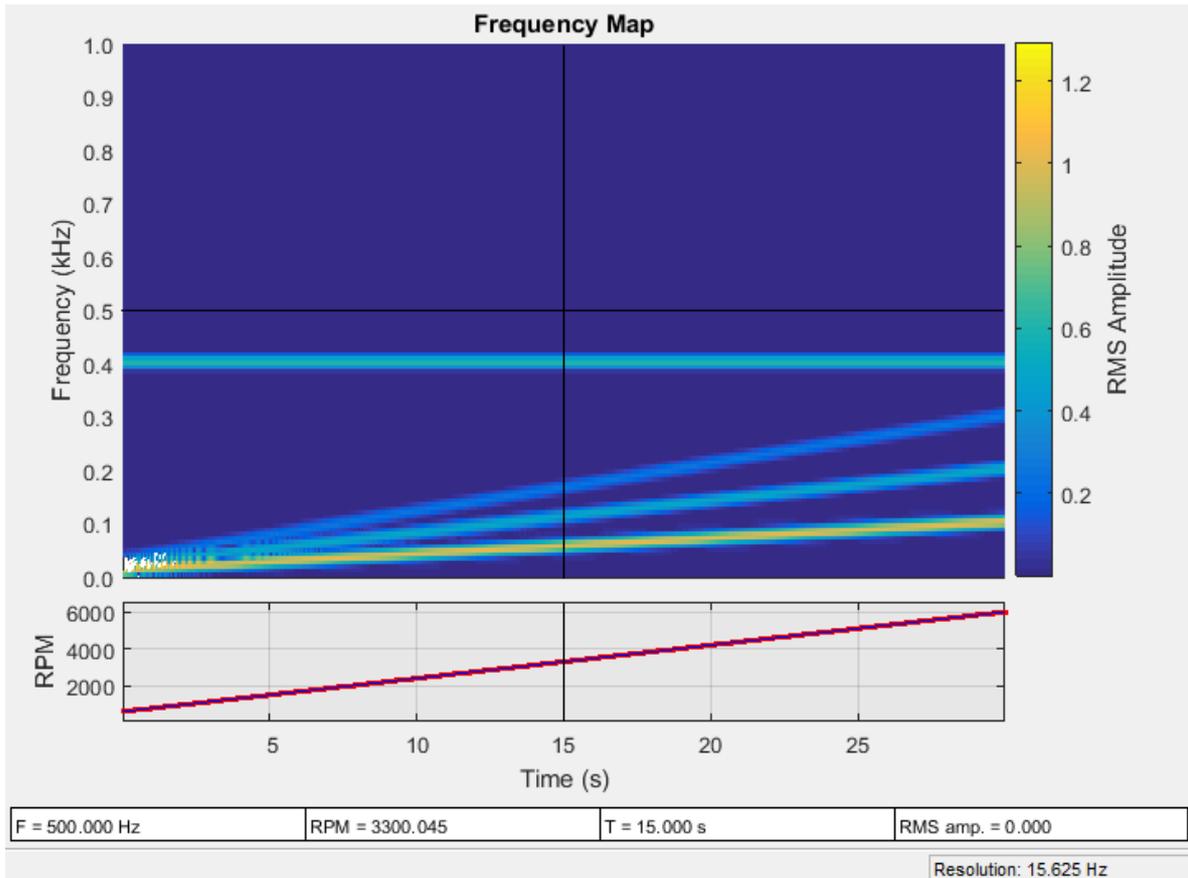


Figura 7-2. Mapa de color con resolución en frecuencia 15.625 Hz.

Con el cursor que se mueve sobre el mapa, podemos colocarnos encima y conocer la frecuencia, valor RPM, el tiempo y la amplitud RMS del mapa (en los cuadrados inferiores).

Las curvas del mapa de frecuencias RPM, tienen frecuencias que aumentan con la velocidad del motor. Esto sugiere que las curvas son órdenes de la frecuencia de rotación del motor. Sin embargo, una de estas curvas se mantiene a frecuencia constante. Esta última se corresponde con la resonancia, que ocurre a una frecuencia de 400 Hz con un nivel RMS constante de 0.6.

Además en el menú superior de la ventana se puede seleccionar 'waterfall plot', generando un diagrama de cascada tridimensional, Figura 7-3.

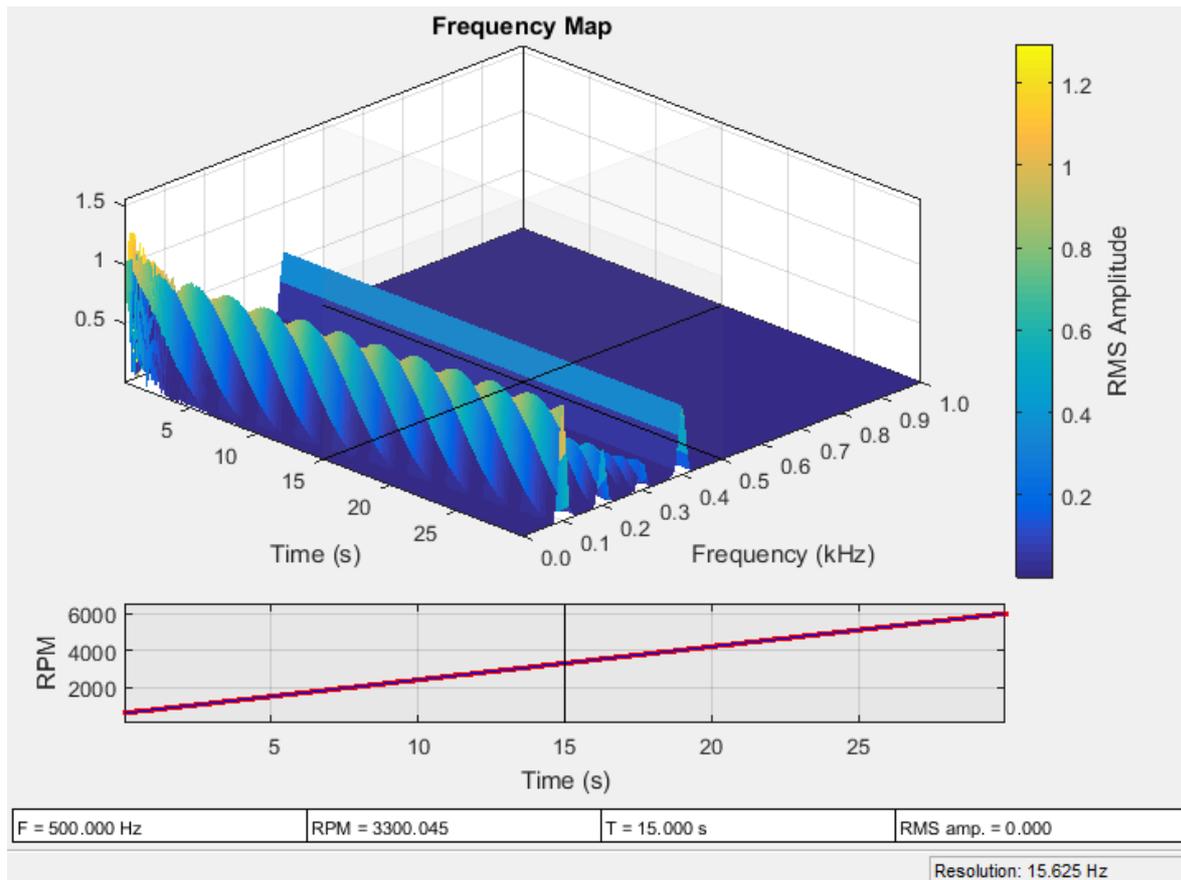


Figura 7-3. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 15.625 Hz.

Por defecto, `rpmfrepmap`, calcula la resolución como $\frac{f_s}{128} = 15.625 \text{ Hz}$ para este caso, tal y como se muestra en la esquina inferior derecha de la figura. Por defecto se usa una ventana de Hanning, aunque están disponibles otras ventanas.

Si se le dice a la función `rpmfrepmap` que opere con una resolución menor (por ejemplo 10Hz), con el fin de eliminar el efecto de manchado que aparece en todas las curvas en la Figura 7-3.

Para comprobar este hecho, un mapa de frecuencias RPM con una resolución de 10Hz, Figura 7-4. En este nuevo mapa, las curvas son mucho más nítidas. Los órdenes de vibración cambian la frecuencia dentro de cada ventana de tiempo a medida que aumenta la velocidad del motor, produciendo una curva espectral más amplia.

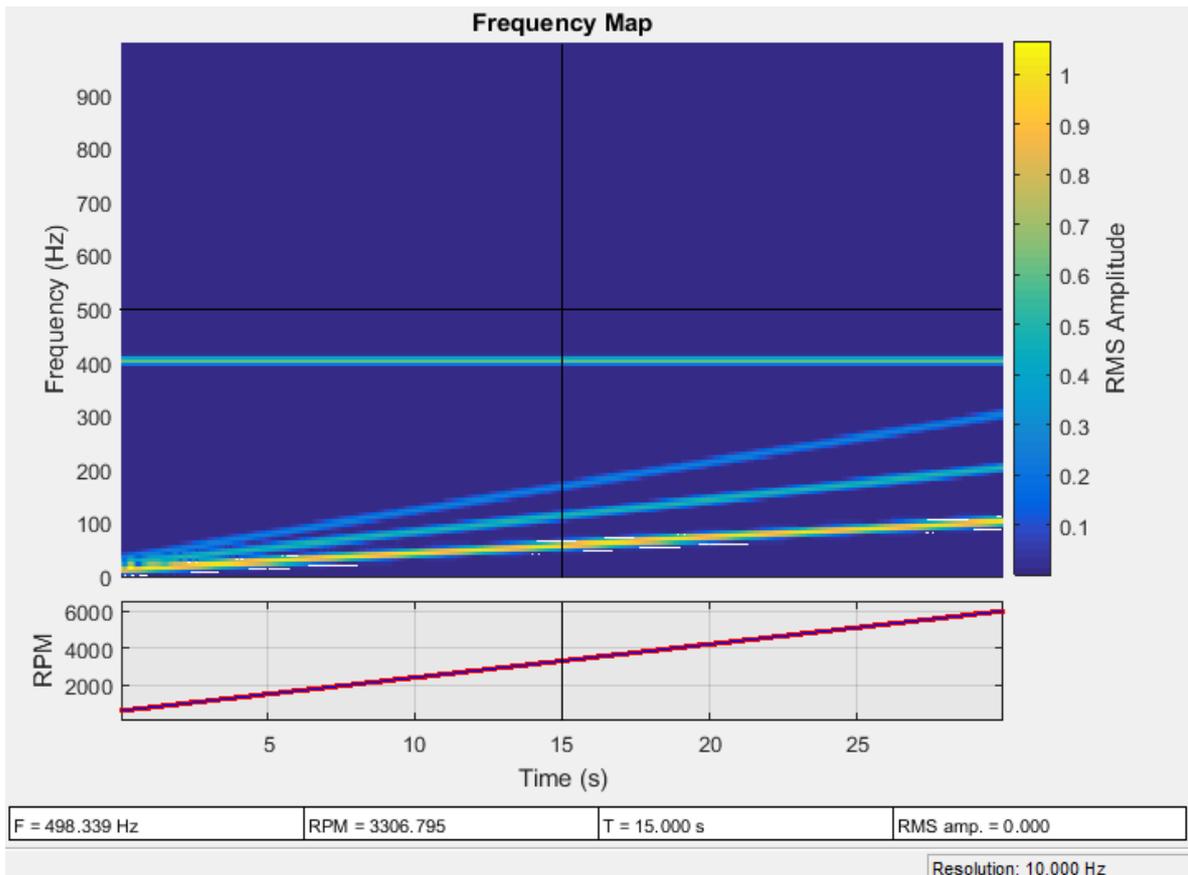


Figura 7-4. Mapa de color con resolución en frecuencia 10 Hz.

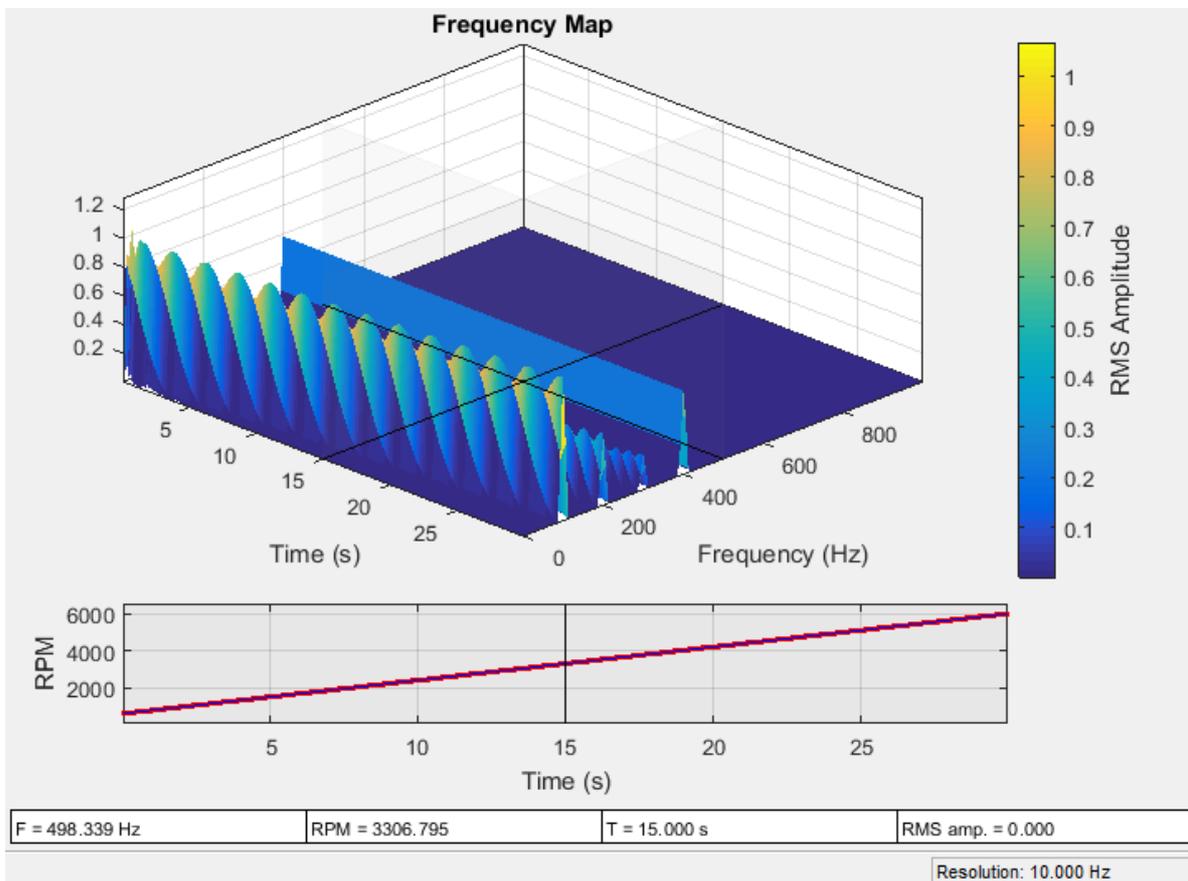


Figura 7-5. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 10 Hz.

La función `rpmordermap` genera un mapa espectral de orden frente a RPM para el análisis de orden. Este enfoque elimina las manchas, realizando un remuestreo de la señal en incrementos de fase constante, produciendo una sinusoide estacionaria para cada orden. La señal remuestreada se analiza utilizando una transformada de Fourier de corta duración. Puesto que cada orden es un múltiplo fijo de la velocidad de rotación de referencia, un mapa de orden contiene una curva de orden recta en función de RPM para cada orden.

La función `rpmordermap` acepta los mismos argumentos que `rpmfreqmap` y también produce una ventana de trazado interactiva cuando se llama sin argumentos de salida. El parámetro de resolución ahora se especifica en órdenes, en lugar de en Hz, y el eje espectral del mapa es ahora orden, en lugar de frecuencia. La función utiliza una ventana plana por defecto.

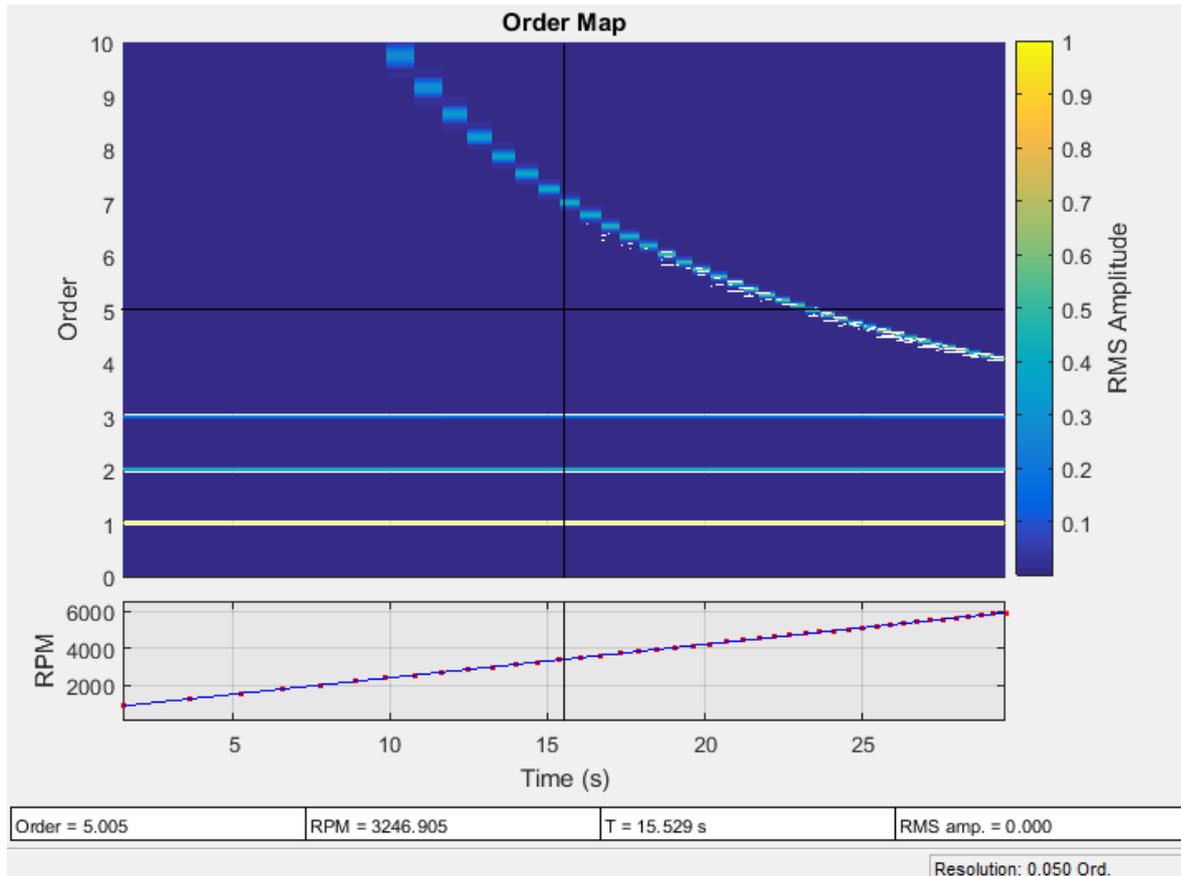


Figura 7-6. Mapa de órdenes con remuestreo síncrono.

El mapa contiene una curva recta para cada orden, indicando que la vibración ocurre a un múltiplo fijo de la velocidad de rotación del motor. Los mapas de órdenes permiten relacionar cada componente espectral con la velocidad del motor. Las manchas se reducen significativamente en comparación con el mapa de frecuencias RPM.

A continuación, se va a determinar las ubicaciones de los órdenes máximos del mapa de órdenes.

La función `rpmordermap` devuelve el mapa y el orden correspondiente y los valores RPM como salidas. Hay que analizar los datos para determinar los órdenes asociados a las vibraciones de alta amplitud. Se usa `orderspectrum` para calcular y trazar el espectro promedio de `map`. La función toma el mapa de orden generado por `rpmordermap` como entrada y lo promedia en el tiempo.

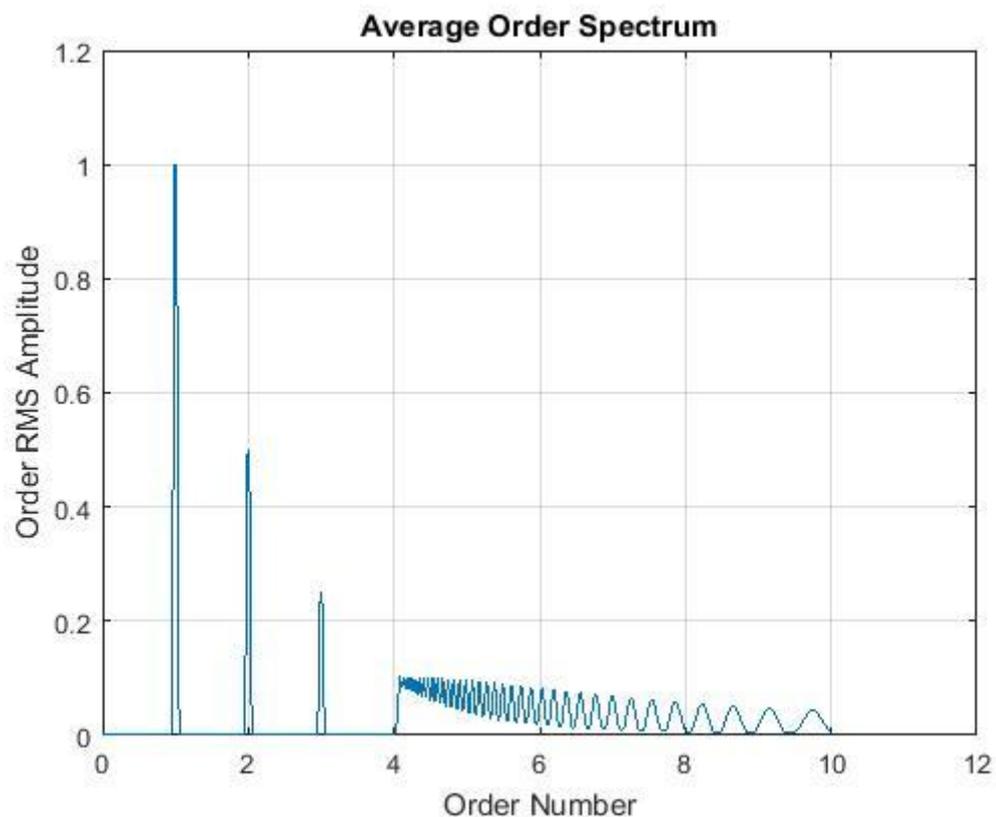


Figura 7-7. Amplitud RMS media de cada orden.

Por otro lado, la función `findpeak` nos devuelve la ubicación de los dos picos más altos.

```
peakOrders =
```

```
0.9940  
2.0020
```

Para encontrar las amplitudes de los órdenes de pico en función del tiempo se usa `ordermap`. Usa `map` como una entrada y traza la amplitud de los dos órdenes de pico por orden de orden, llamando a `ordermap` sin argumentos de salida.

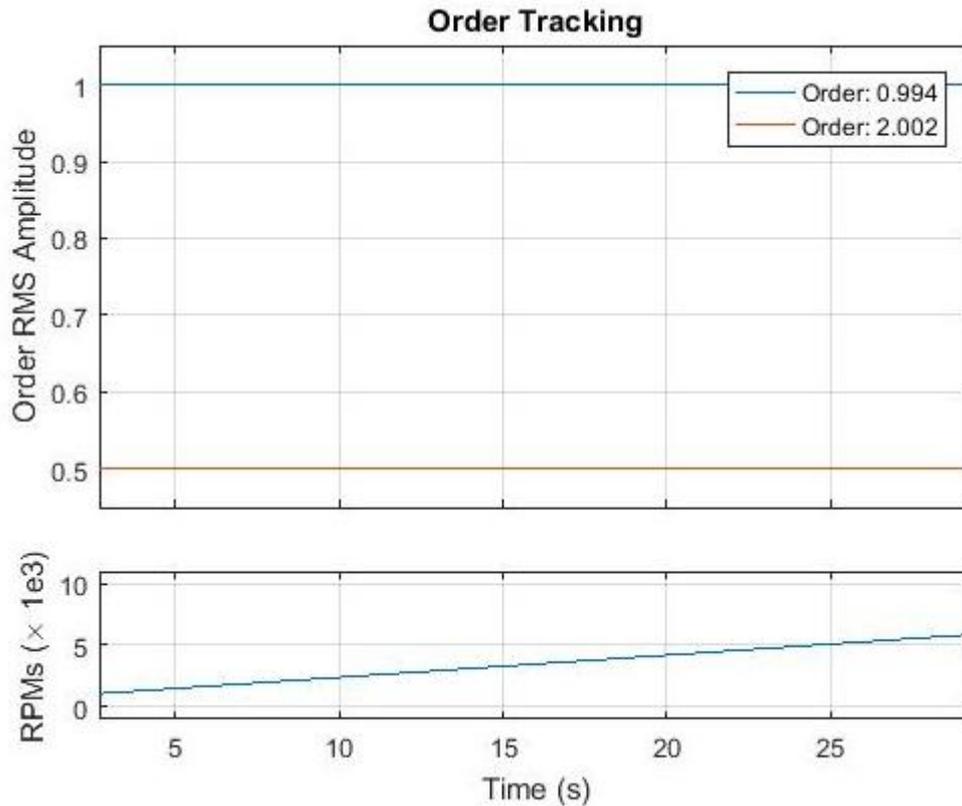


Figura 7-8. Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking.

Ambos órdenes tienen niveles de amplitud RMS constantes a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor. Aunque en este caso los órdenes sean fácilmente diferenciables, `ordertrack` también puede separar órdenes que se cruzan cuando hay varias señales RPM presentes.

7.2 Ejemplo 2.

El siguiente ejemplo de la ayuda que ofrece Matlab en el tema “Order Analysis of a Vibration Signal”. En él se investiga de dónde proviene una fuente de vibración no deseada en una cabina de helicóptero haciendo uso del análisis de órdenes.

Se analizarán los datos de vibración simulados de un acelerómetro en la cabina de un helicóptero durante una subida y bajada del motor principal. Un helicóptero tiene varios componentes giratorios, incluyendo el motor, la caja de engranajes y los rotores principales y de cola, ambos con cuatro palas. Cada componente gira a una velocidad fija conocida con respecto al motor principal, y cada uno puede contribuir a la vibración no deseada. La frecuencia de los componentes de vibración dominante se relacionará con la velocidad de rotación del motor para investigar la fuente de vibración de alta amplitud. Los componentes importantes de la vibración de un rotor de helicóptero se pueden encontrar en múltiplos enteros de la frecuencia de rotación del rotor cuando la vibración es generada por las palas del rotor.

7.2.1 Código Matlab

```

clc; clear all, close all,
% Se leen los datos que incluyen:
%   - rpm: velocidad angular de la turbina del motor
%   - vib: señal de vibración, medida en voltios
%   - t : vector de instantes de tiempo
%   - fs : frecuencia de muestreo 500Hz.
%   - mainRotorEngineRatio: relación entre la velocidad del rotor
%     principal y la velocidad del motor, 0.0129
%   - tailRotorEngineRatio: relación entre la velocidad del rotor
%     de cola y la velocidad del motor, 0.0658

load helidata

%% 2. Análisis de órdenes

vib = x - mean(x); % se elimina la componente de continua de la señal

% Dibuja la velocidad de rotación del motor
subplot(2,1,1) %divide el espacio de la figura en una matrix MxN ejes,
siendo plot(M,N,P), y selecciona los ejes P para colocar el gráfico.
plot(t,rpm) % Plot the engine rotational speed
xlabel('Time (s)')
ylabel('Engine Speed (RPM)')
title('Engine speed')

%Dibuja la señal de vibración
subplot(2,1,2)
plot(t,vib) % Plot the vibration signal
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (mV)')
title('Accelerometer Vibration Data')

rpmfreqmap(vib,fs,rpm) % RES=fs/128 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,1) % RES=1 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,5) % RES=5 Hz

rpmordermap(vib,fs,rpm,0.005) % RES=0.005 orden
[map,mapOrder,mapRPM,mapTime] = rpmordermap(vib,fs,rpm,0.005);

figure
orderspectrum(map,mapOrder)
[spec,specOrder] = orderspectrum(map,mapOrder);
[~,peakOrders] = findpeaks(spec,specOrder,'SortStr','descend','NPeaks',2);
peakOrders = round(peakOrders,3)
figure
ordertrack(map,mapOrder,mapRPM,mapTime,peakOrders)

```

7.2.2 Resultados

En primer lugar se ilustra la velocidad del motor y los datos de vibración como funciones del tiempo:

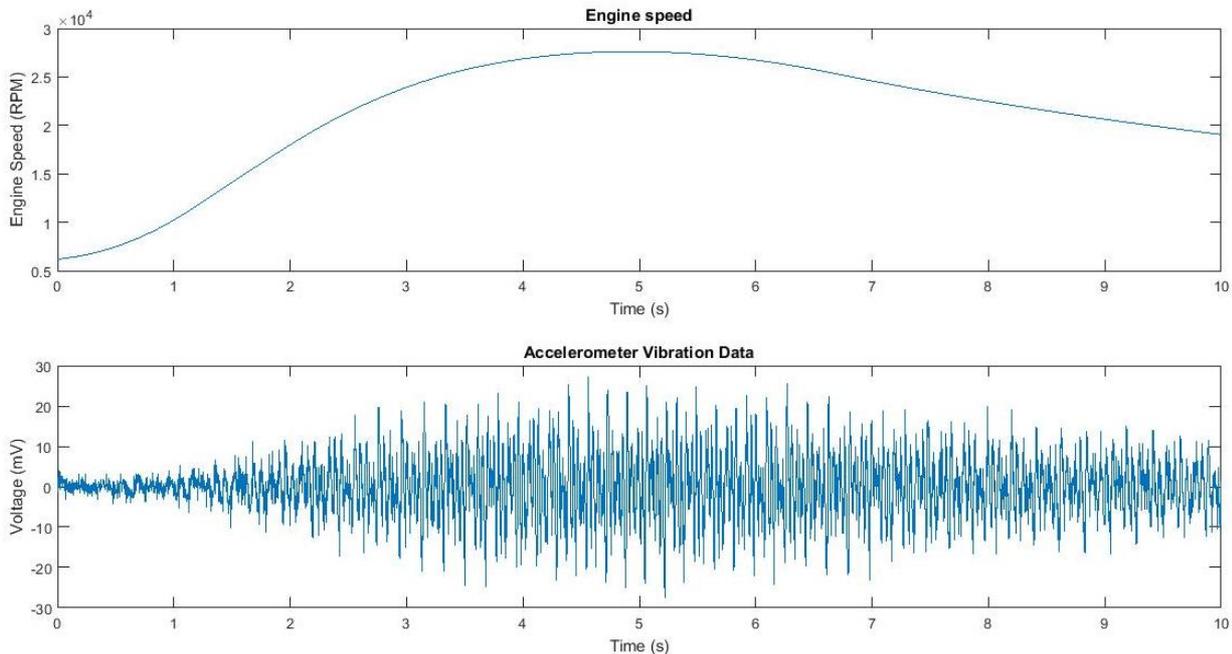


Figura 7-9. Superior, velocidad del motor medida en revoluciones por minuto. Inferior, señal de vibración en función del tiempo.

En este ejemplo, los datos leídos contienen la velocidad de rotación del motor, rpm, y por lo tanto no se necesita conversión.

La velocidad del motor aumenta rápidamente durante el arranque y disminuye progresivamente durante el run-down. La amplitud de la vibración cambia en función de la velocidad de rotación. Este tipo de perfil de RPM también es típico para analizar vibraciones en maquinaria rotativa. La amplitud de la señal de vibración evoluciona a la vez que las revoluciones, al aumentar la velocidad del motor aumentan la vibración y viceversa.

En la Figura 7-10 se visualiza la señal de vibración usando la función `rpmfreqmap`. Esta función calcula la STFT de la señal y genera un mapa de frecuencias RPM. Hay que recordar que estas curvas son órdenes de la velocidad de rotación del motor, pues evolucionan esta. La vista tridimensional de la Figura 7-11 es el diagrama de cascada correspondiente.

En ambas figuras la resolución en frecuencia es por defecto calculada como $\frac{f_s}{128} = 3.906 \text{ Hz}$. Hay componentes de alta amplitud (RMS) cerca del pico RPM, con frecuencias entre 20-30 Hz (zona amarilla). Sin embargo, estas curvas de alta amplitud parecen mezclarse. Para resolver estas componentes se prueba con una frecuencia menor, 1Hz, y con otra mayor, 5Hz.

En la Figura 7-12, se puede ver que al reducir la resolución en frecuencia se distinguen con más nitidez las líneas de mayor amplitud. Sin embargo, ahora las otras curvas se ven como a manchas, como consecuencia de que la velocidad de rotación está cambiando más rápidamente. Los órdenes de vibración cambian la frecuencia dentro de cada ventana de tiempo a medida que aumenta o disminuye la velocidad del motor, produciendo una curva espectral más amplia. Este efecto de 'manchas' es más pronunciado para una resolución más fina debido a que se requieren ventanas de tiempo más largas. En este caso, la mejora de la resolución espectral resultó en un aumento de manchas durante las fases de subida y bajada.

Por otro lado al poner una resolución en frecuencia más basta, Figura 7-13, las ventanas de tiempo son más cortas, dando lugar a una curva espectral más estrecha. En este caso, desaparecen las manchas, en contraposición de un emborronamiento de las curvas de ala amplitud RMS.

Por todo ello, hay que llegar a una solución de compromiso entre manchas y resolución a baja frecuencia.

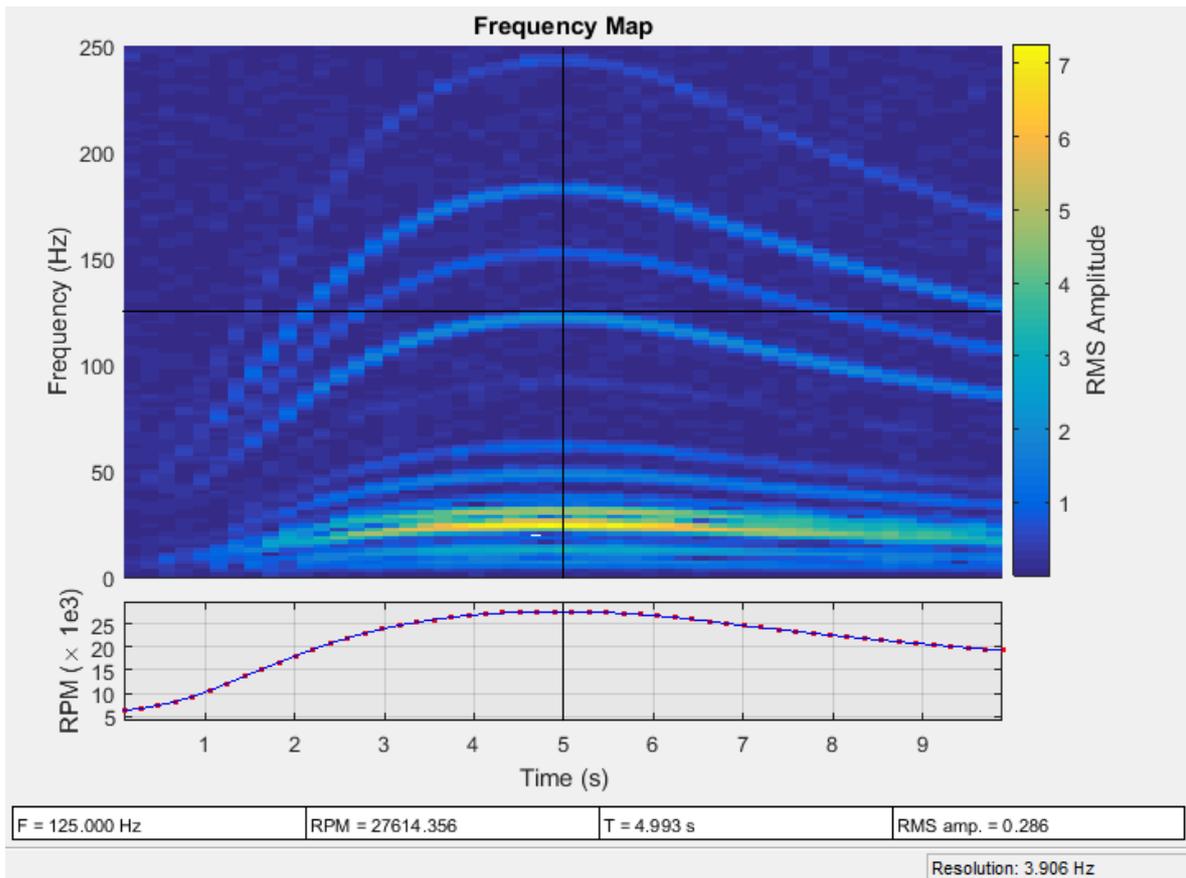


Figura 7-10. Mapa de color con resolución en frecuencia 3.906 Hz.

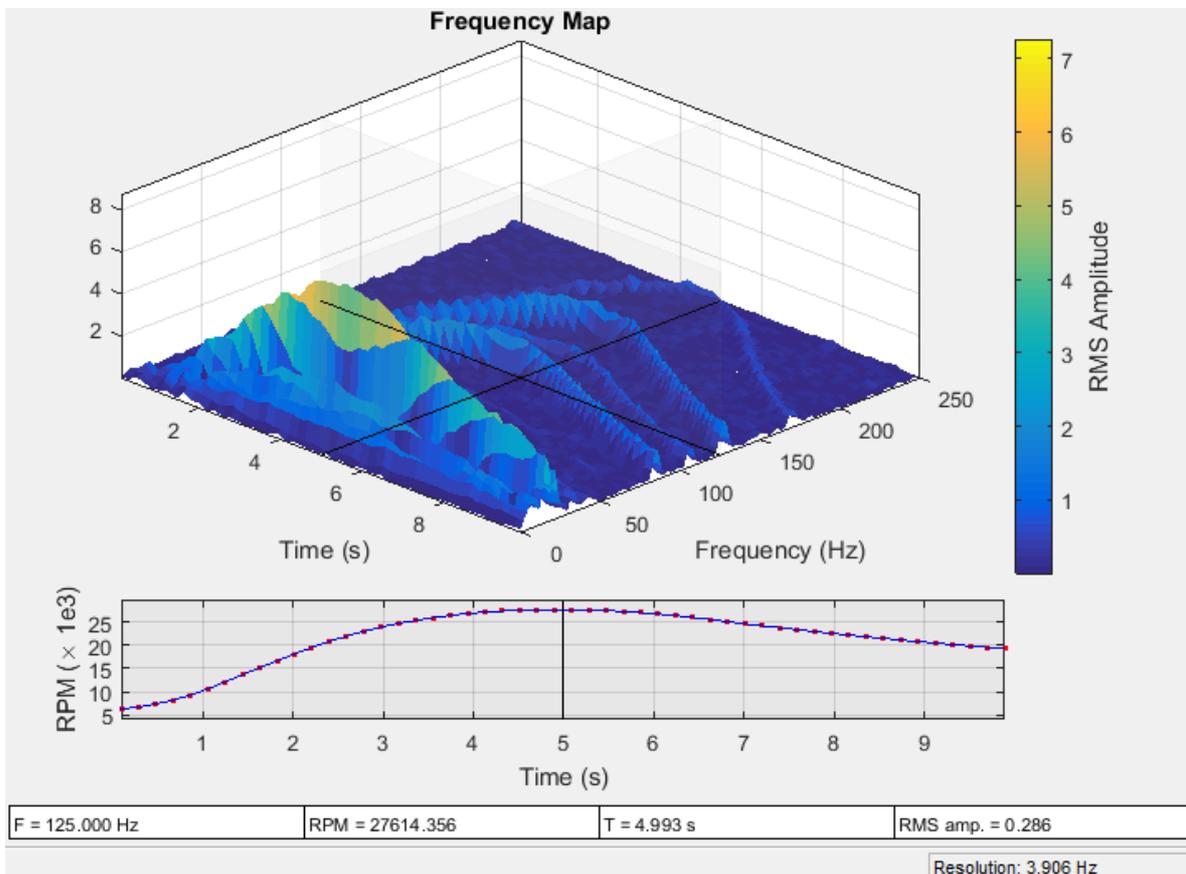


Figura 7-11. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 3.906 Hz.

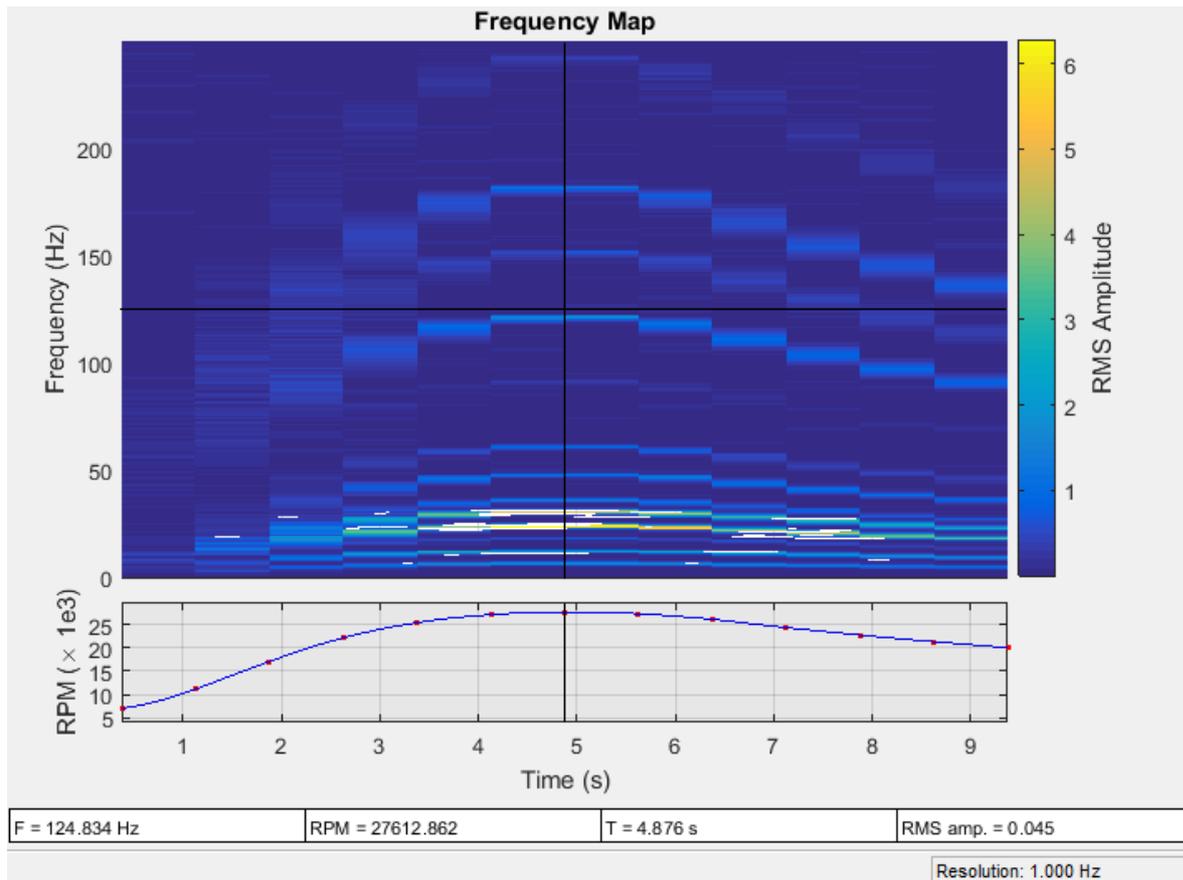


Figura 7-12. Mapa de color con resolución en frecuencia 1 Hz.

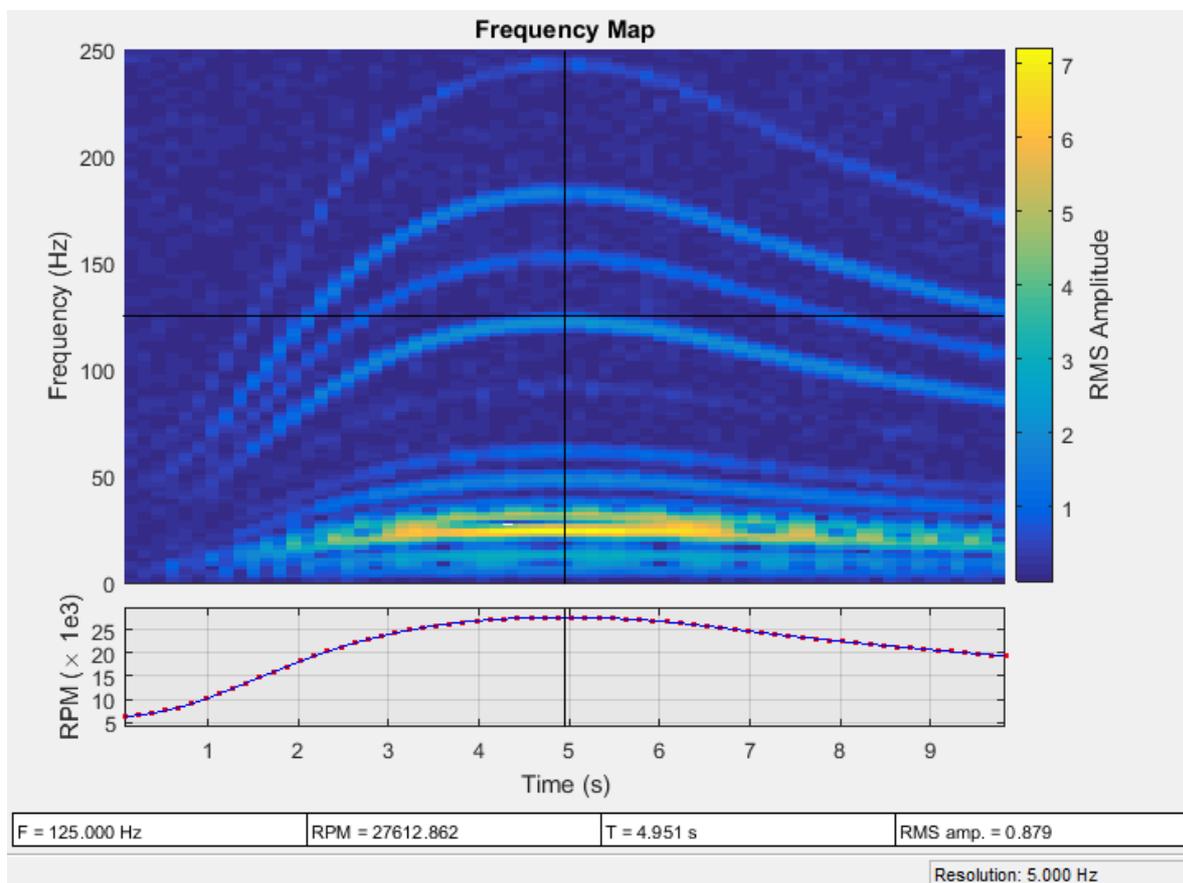


Figura 7-13. Diagrama de cascada con resolución en frecuencia 1 Hz.

Con el fin de paliar el problema de manchas de los mapas de color, se realiza un remuestreo sincrónico de la señal de vibración, con incrementos de fase constante, y se plasma en un mapa “order track”, Figura 7-14. Cada una de las líneas rectas representa un orden de la velocidad de rotación del motor, pudiéndose ver cuáles son aquellos órdenes que contribuyen en mayor medida a la vibración.

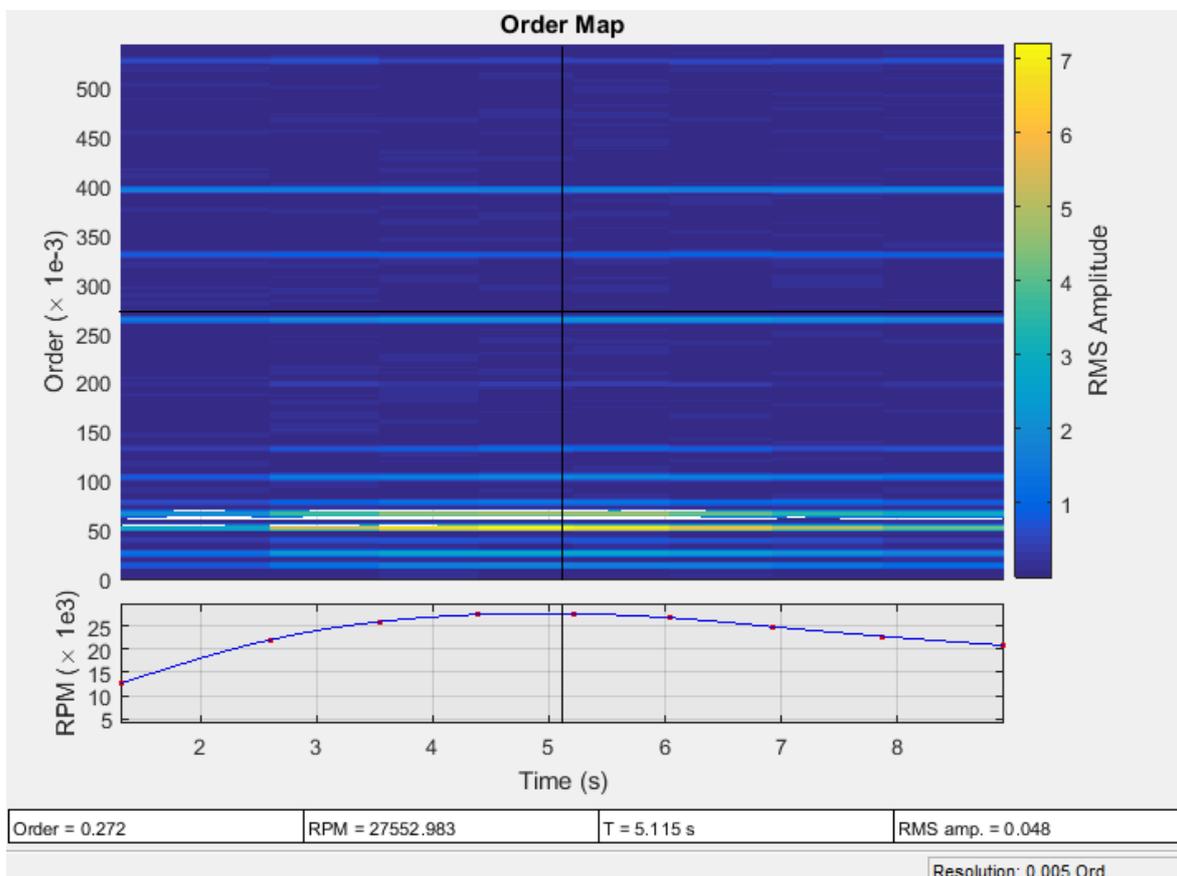


Figura 7-14. Mapa de órdenes con remuestreo sincrónico.

Para ver los órdenes pico, se representan cada uno de los órdenes frente a la amplitud RMS, Figura 7-15. Tal y como puede comprobarse en el dibujo, los dos picos dominantes están muy cerca entre ellos, entorno a un orden de 0.05. Los órdenes pico son menores que 1 porque la frecuencia de vibración es menor que la velocidad de giro del motor.

PeakOrders =

0.0520
0.0660

La evolución de la amplitud RMS de estos órdenes pico se muestra en la Figura 7-16. Ambos órdenes aumentan en amplitud a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor.

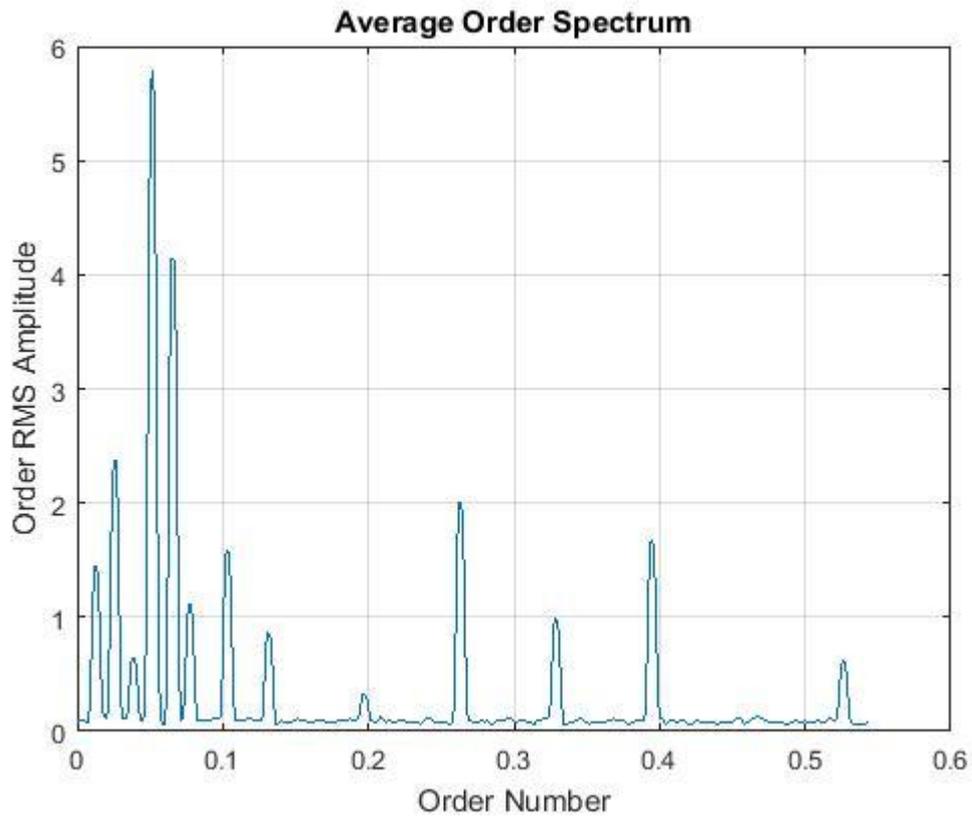


Figura 7-15. Amplitud RMS media de cada orden.



Figura 7-16. Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking.

Para identificar las fuentes de vibración de la cabina, se compara el orden de cada pico con el orden de cada

uno de los rotores del helicóptero. El orden de cada rotor es igual a una proporción fija de la velocidad del rotor con la velocidad del motor.

```
mainRotorOrder = mainRotorEngineRatio;  
tailRotorOrder = tailRotorEngineRatio;  
  
ratioMain = peakOrders/mainRotorOrder  
ratioMain =  
  
    4.0310  
    5.1163  
  
ratioTail = peakOrders/tailRotorOrder  
ratioTail =  
  
    0.7904  
    1.0032
```

El pico más alto se encuentra en el orden 4 de la velocidad del rotor principal, por lo que la frecuencia de la componente máxima es 4 veces la frecuencia del rotor principal. Como el rotor principal tiene 4 palas es un buen candidato para ser la fuente de esta vibración, porque para un helicóptero con N palas por rotor, la vibración N veces la velocidad del motor es común.

Por otro lado, el segundo pico más alto se encuentra en un orden 1 de la velocidad de rotación del rotor de cola, sugiriendo que la vibración puede originarse en el rotor de cola. El hecho se debe a que las velocidades de ambos rotores no estén relacionadas por un factor entero, el orden del segundo pico con respecto a la velocidad del rotor principal no es un número entero.

8 CONCLUSIONES

Se comenzó el proyecto presentando el análisis de órdenes como una herramienta muy potente para el mantenimiento, ya es capaz de detectar fallos y defectos en la maquinaria en sus etapas más tempranas.

Esta técnica se basa en el análisis de las vibraciones y el ruido de las máquinas giratorias, resultantes de las fuerzas periódicas que actúan sobre la misma. Realizando un seguimiento de los niveles RMS variables en el tiempo se puede determinar la fuente de la vibración y ruido. Esto es consecuencia de cada una de las fuentes produce vibración en un factor particular multiplicado por la velocidad de rotación de la máquina.

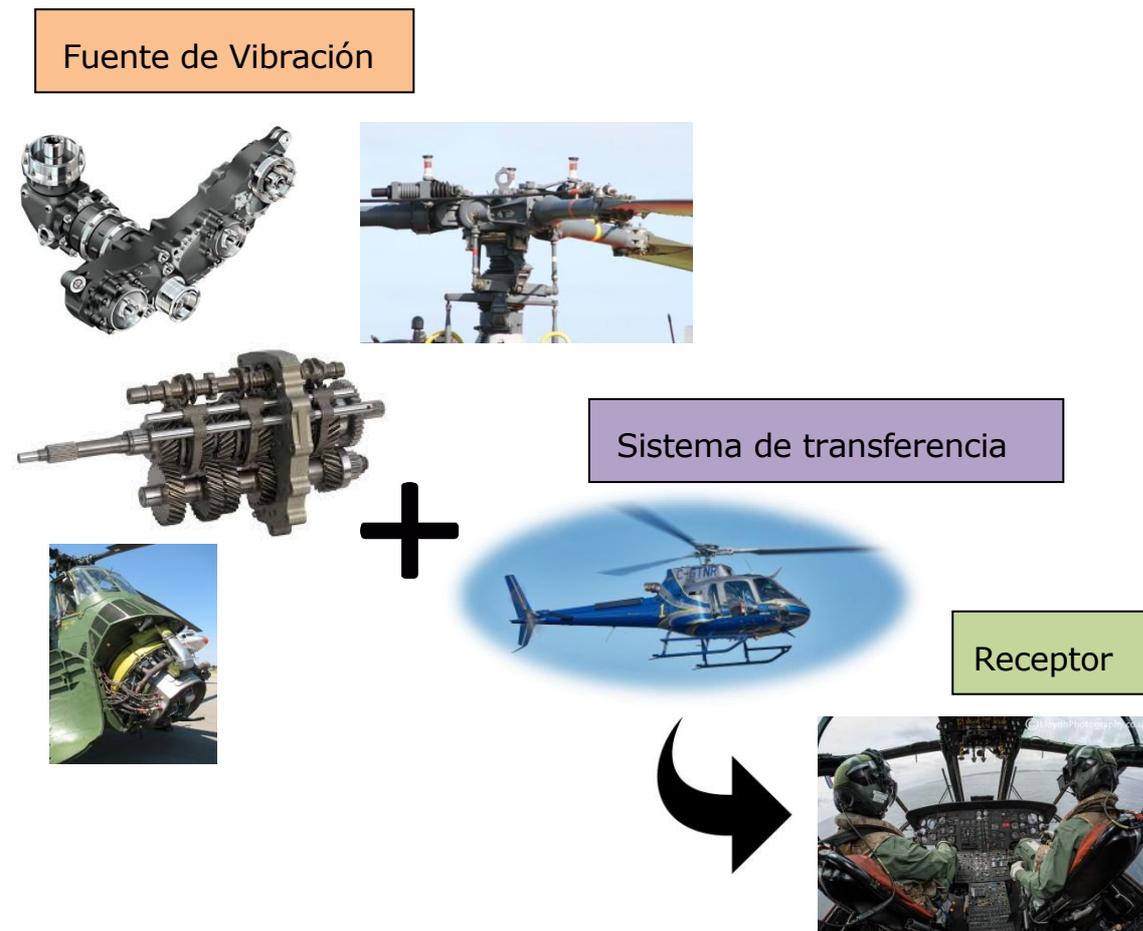


Figura 8-1. Modelo Fuente-Sistema de transferencia- Receptor de la vibración y ruido.

A lo largo del trabajo se ha discutido algunos aspectos del análisis de vibración de maquinaria rotativa y datos acústicos con el análisis de órdenes usando frecuencia de muestreo fija, frecuencia de muestreo síncrona y filtro Vold-Kalman. De particular importancia para el análisis de tiempo-frecuencia, y el cual está condicionado incertidumbre que resulta de la limitación de ancho de banda-tiempo existente en todo análisis de frecuencia. También, se ha demostrado que la elección de una ventana de tiempo y el método de extracción de orden apropiado puede dar lugar a algunas diferencias en los resultados como consecuencia del efecto de manchas. Usando una ventana de Hanning y la suma de cinco valores de frecuencia alrededor del pico para obtener el nivel RMS resultó ser la mejor opción respecto a otras ventanas actualmente utilizadas. Como todos los análisis en el artículo se realizaron en MATLAB, también se demostró que este entorno es una buena plataforma para analizar los datos de maquinaria rotativa.

Pese a ciertas barreras que quedan por superar que llevan a errores en los resultados, como la limitación del producto BT, el análisis de órdenes resulta ser una herramienta muy fiable para detección de problemas en máquinas rotativas.

La necesidad que surge de reducir los costes derivados de las reparaciones, tiempos de inactividad no planificados y consecuente disminución de la producción, junto con los avances tecnológicos y desarrollos de métodos como el análisis de órdenes han permitido un cambio en las estrategias de mantenimiento. La tendencia actual es el Mantenimiento Predictivo el cual se basa en la condición o estado de la máquina, pues conociendo el comportamiento de la misma es posible prever qué elemento va a fallar y cuándo. Esto permite actuar sobre el problema sin necesidad de afectar a la producción, minimizando los costes de producción, mano de obra y repuestos.

Las líneas futuras avanzan hacia un mantenimiento proactivo con el cual no solo se puede determinar qué elemento va a fallar, sino que además se analizan las causas que han ocasionado el fallo.

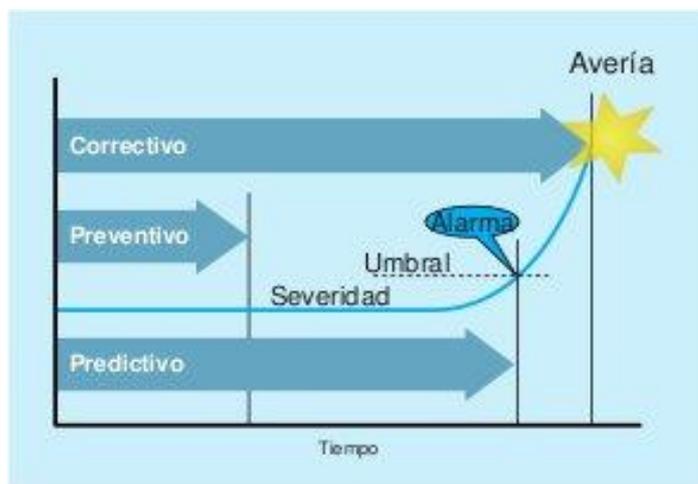


Figura 8-2. Comparación entre diferentes tipos de mantenimiento.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brigham, E. Oran, (1988), *The fast Fourier transform and its applications*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall
- [2] Randall, R.B., (1987), *Frequency analysis*, B. Tech, Dinamarca, Brüel & Kjaer.
- [3] Oppenheim, Alan V., (2011), *Tratamiento de señales en tiempo discreto*, Madrid, Prentice Hall.
- [4] Brandt, A., (2011), *Noise and Vibration Analysis : Signal Analysis and Experimental Procedures*, Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- [5] Bently, Donald E., (2002), *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, Miden, Canada, Bently Pressurized Bearing Press.
- [6] Matlab, (2016), Order Analysis of a Vibration Signal, Natick, United States, MathWorks. Recuperado de <https://es.mathworks.com/help/signal/examples/order-analysis-of-a-vibration-signal.html>
- [7] CT SOLUTIONS GROUP, (2016), Webinar: Fundamentos de vibración en aplicaciones de maquinaria rotativa. Recuperado de <http://www.ctsolutions.es/event/webinar-fundamentos-de-vibracion-en-aplicaciones-de-maquinaria-rotativa/>
- [8] Sinais, Ingeniería de Mantenimiento, (2015), Tipos de mantenimiento., Sinais. Recuperado de http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/intro/tipos_mantenimiento.html
- [9] Peter Goossens,(2013), Main Rotors & Rotorhead, HELY START. Recuperado de <http://www.helistart.com/RotorSystem.aspx>