

BASICS CONCEPTS IN THE ANALYSIS OF SIGNALS VIBRATION**FUNDAMENTOS BASICOS EN EL ANALISIS DE SEÑALES DE VIBRACION**

MSc. Elkin G. Florez S*, PhD. Salvador Cardona Foix
PhD. Jordi Martínez Miralles****

***Dpto de Ing. Mecánica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.**

E-mail: eflorez@unipamplona.edu.co

**** Lab. de Vibraciones. Dpto. de Ing. Mecánica., Universidad Politécnica de
Cataluña, Barcelona, España.**

E-mail: {salvador.cardona, jmartinez.miralles}@upc.edu

Abstract: The present article takes as an aim to present a compilation of technical information, referent to acquisition, conditioning and signal analysis of vibration. In the tests of vibrations is necessary to obtain the maximum possible benefit when there are applied the vibration study techniques to a wide range of practical problems of engineering. The maximum benefits are obtained when the instrumentation and the analysis techniques used are the appropriate ones and consistent ones with the aim of the test. The most sophisticated in instrumentation and the best methods of analysis can be easily affected by a deficient assembly, an inaccurate sampling, a bad selection of the instrumentation, etc. Therefore the present work shows the fundamental principles and the general characteristics that surround a test of vibrations

Resumen: El presente artículo tiene por objetivo presentar una recopilación de información técnica referente a la adquisición, acondicionamiento y análisis de señales de vibración. En los ensayos o pruebas de vibraciones es necesario obtener el máximo beneficio posible cuando se aplican técnicas de estudio de vibraciones a un amplio rango de problemas prácticos de ingeniería. Los máximos beneficios se obtienen cuando la instrumentación y las técnicas de análisis utilizadas son las apropiadas y consistentes con los objetivos de la prueba. Lo mas sofisticado en instrumentación y los mejores métodos de análisis se pueden fácilmente verse afectados por un pobre montaje, un inexacto muestreo, una mala selección de la instrumentación, etc. Por lo tanto el presente trabajo muestra los principios fundamentales y las características generales que envuelven un ensayo o prueba de vibraciones.

Keywords: Vibration, Sensor, Data acquisition, Noise, Filters, Signal vibration.

1. INTRODUCCION

Un objetivo importante de las medidas de vibración es el diagnóstico de la operación correcta de un elemento mecánico o una máquina. Para este propósito, el punto de la medida, la cantidad de la

medida y el método de la medida se deben elegir apropiadamente para alcanzar resultados significativos. Puesto que hay una variedad grande de vibraciones, un solo tipo de recolección de vibración no será suficiente para cubrir todos los usos. Cuando se ha seleccionado un método de

recolección, se debe definir el tipo de unidad de salida. El análisis de vibraciones se utiliza para conocer la integridad de los sistemas de diferentes usos, y su aplicación puede estar enfocada a conocer el comportamiento dinámico del sistema en condiciones de operación o la respuesta del sistema (en frecuencia o amplitud) a una excitación externa.

Manipular un ensayo o análisis de vibraciones en campo o en el laboratorio implica la manipulación de sensores, filtros, amplificadores, analizadores de datos entre otros. El uso de estos equipos y la interpretación de los resultados de la prueba requieren la comprensión considerable de los fenómenos de la vibración así como análisis y conceptos experimentales. Por lo tanto, el encargado de hacer la adquisición y el análisis de vibraciones tiene una influencia dominante en la calidad de los resultados de la prueba.

En la figura 1 se puede observar un sistema de adquisición de señales, el cual se aplica para obtener señales de vibración. Se puede observar los diferentes componentes y su respectiva ubicación durante todo el proceso, desde el fenómeno físico sentido por un instrumento de medición hasta el análisis de la señal utilizando un software especializado.

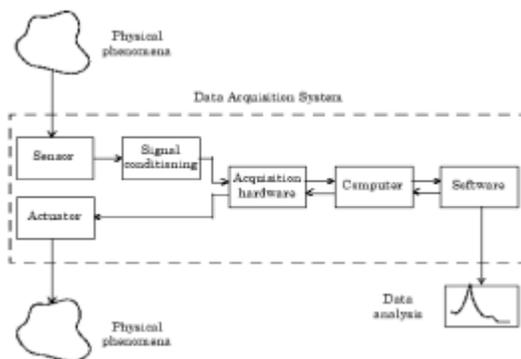


Fig. 1: Sistema de adquisición de señales [11]

El análisis de señales a sido siempre una importante e indispensable herramienta en el diagnóstico de falla en equipos basado en vibraciones, así como, en muchas otras aplicaciones prácticas. En la aplicación del diagnóstico de fallas en maquinaria basado en vibraciones, el análisis de señales nos permite investigar las características dinámicas de la maquinaria bajo diferentes tipos de fallas, y a demás conocer las características de la falla si esta

se presenta e identificar la causa de la misma. En el análisis de señales la transformada de Fourier ha sido muy importante por su fácil obtención e interpretación y especialmente en señales estacionarias y lineales [4].

En la evolución en el campo del estudio de las vibraciones hay muchas personas que presentaron grandes aportes. Por supuesto que en dichas aportaciones no sólo se contemplan los avances en la comprensión analítica de las de las vibraciones, sino que se deben considerar también los desarrollos en cuanto a los accesorios, métodos de medición y análisis de las señales de vibraciones.

2. ADQUISICION DE SEÑALES DE VIBRACION

En un sistema de medida de vibraciones hay que adquirir la información (en forma de señales), procesarla y presentarla. Y en la mayoría de casos hay que registrarla.

Las señales de vibración están presentes en sistemas dinámicos y se ha de tener en cuenta que en estos, uno o varios parámetros son dependientes del tiempo en forma continua, y su comportamiento presenta una evolución temporal y frecuencial.

Las vibraciones que se presentan en un sistema real son de un comportamiento continuo en el tiempo, y puede llegar a presentar variación de la amplitud y frecuencia, por lo tanto es importante antes de conocer algún sistema de adquisición de señales (o datos) de vibración, conocer y entender las cantidades físicas que se quieren medir, sus características y los sensores apropiados a ser utilizados así como también el hardware y/o software que se va a implementar.

2.1 Señales de vibración

Las tipos de señales de vibración varían ampliamente y una rica terminología se utiliza para caracterizarlas en forma general. Existen autores que se han encargado de hacer una clasificación general de los tipos de señales, [1][2][8], y que se pueden tener en cuenta a la hora de realizar un análisis de señales de vibración. En consecuencia cualquier estudio de análisis de vibraciones debe comenzar con la clasificación de los tipos de señales que se encuentran.

En la siguiente figura se muestra una clasificación general de los tipos de señales de vibración.

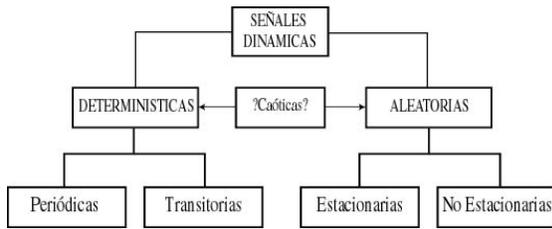


Fig. 2: Clasificación de señales dinámicas [8]

Las señales de vibración al igual que los tipos de vibración se pueden clasificar en deterministas y aleatorias, las primeras pueden ser descritas por una función matemática explícita o por un conjunto de datos o por una regla bien definida y por lo tanto el valor de la señal, tanto presentes como pasados como futuros, se conocen exactamente, sin incertidumbre, Las segundas son señales que no pueden describirse con un grado de precisión razonable mediante formulas matemáticas explícitas. La falta de tal relación supone que dichas señales evolucionan con el tiempo [1].

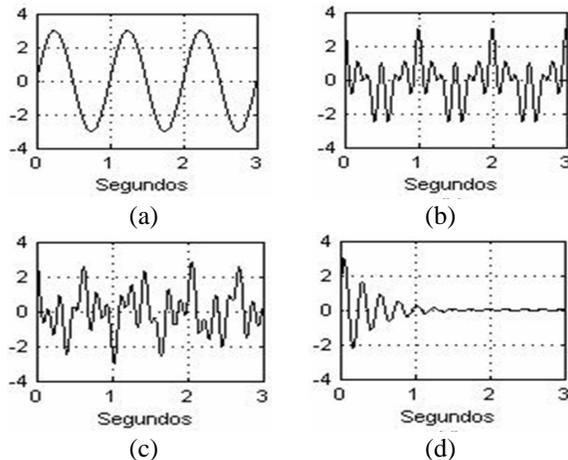


Fig. 3: Señales deterministas a) armónica, b) periódica compleja, c) cuasiperiódicas, d) Transitorias

Las **señales de vibración deterministas** pueden ser **periódicas**, si se repiten al cabo de un cierto tiempo como las armónicas, o la periódicas complejas si no se repiten, como las cuasiperiódicas o las transitorias, Figura 2. Las vibraciones periódicas complejas son la suma de vibraciones armónicas de frecuencias con relación racional y las cuasi-periódicas provienen de las sumas de vibraciones armónicas de frecuencia con relación no racional [4]

Las **señales de vibración aleatoria**, son vibraciones que no se pueden describir con un grado de precisión razonable mediante formulas matemáticas explícitas, o cuya descripción es demasiado complicada para ser de utilidad práctica, ver figura 4. La falta de tal relación supone que dichas señales evolucionan con el tiempo de forma impredecible [1]. El análisis de señales de vibración aleatorias se puede describir mediante técnicas estadísticas en vez de formulas Explícitas. El marco matemático para el estudio de estas señales de vibración lo constituye la teoría de probabilidad y los procesos estocásticos. Las señales de vibración aleatoria se dividen en **ergódicas**, cuando la probabilidad, de que todos los valores estadísticos se pueden determinar a partir de una sola muestra de la señal, sea 1, y si no lo es decimos que es **no-ergódica**.

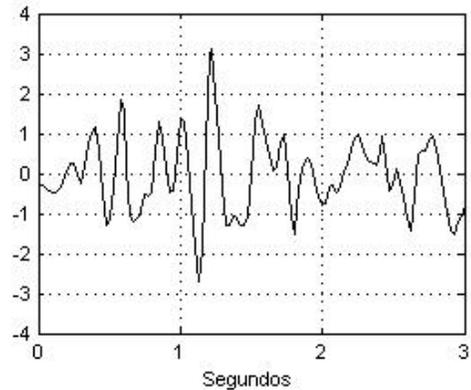


Fig. 4. Señal aleatoria

En el estudio de señales de vibración para condiciones de maquinaria se presenta a menudo una característica altamente aleatoria dado al hecho de que los defectos y las fallas incipientes muchas veces se manifiestan ellos mismos con cambios en el espectro de una señal medida [5].

2.2 Sensores de vibración

El sensor o transductor de vibración es un instrumento que produce una señal eléctrica que es una réplica o análogo del movimiento vibratorio al cual está sujeto, y este movimiento puede estar dado en desplazamiento, velocidad o aceleración, y estas cantidades físicas son una forma de clasificarlos. Un buen sensor no debe agregar falsos componentes a la señal, y debería producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias que nos interesa o para el que está diseñado.

Los sensores responden a los parámetros de la fuente de vibración, por lo tanto se necesita un conocimiento mínimo de las características de señal que vamos a medir y la ubicación adecuada del sensor, algunos trabajos al respecto se han presentado (Worden K, Burrows AP. 2001) (Venna, S.V., Lin, Y.J., 2004), también recomendaciones sobre aplicaciones de sensores (Iddings, Frank A 1997), microsensores (Tzou. H. S. et al) y el desarrollo de sensores inteligentes (Uemura. A, et al), entre otros temas relacionados con el funcionamiento y las aplicaciones de los mismos.

Los sensores se construyen específicamente para satisfacer alguna norma, ejemplo: Deterioro por vibración de maquinas alternativas (ISO 2372), vibraciones en el cuerpo humano (ISO 2631). Un parámetro importante al diseñar o seleccionar un sensor de vibración es su calibración. Existen algunos métodos para calibrar acelerómetros que usan procedimientos estándar como el establecido por la norma ISO 5347-3 (configuración Back to back). Las empresas que ofertan los sensores deben cumplir con la Norma ISO 9000 (párrafo 4.11.1 y 4.11.2).

Para asegurarse de que las calibraciones estén reconocidas la comunidad internacional ha acordado un principio de acreditación y las reglas para su puesta en práctica. Estas reglas se encuentran en el estándar europeo IEC 17025 del 2000 (basado en el EN 45001 y la guía ISO 25) [16]. También es importante, según la aplicación o el sistema al cual se le requiere hacer un análisis de vibraciones, conocer y aplicar los procedimientos establecidos internacionalmente, un ejemplo de esto es la Norma ISO 14837 “*Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems —*”.

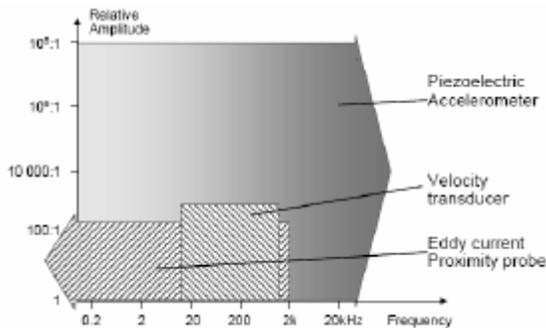


Fig. 5: Rango operacional de un sensor en función de su principio de funcionamiento [16]

Los sensores de vibración tienen su aplicación en función de sus características y su principio de funcionamiento, en la figura 5 podemos ver un ejemplo de ello, mostrando la comparación del rango operacional en frecuencia vs. Amplitud, para sensores de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Las características principales de los sensores de vibración al igual que cualquier otro instrumento de medición, se pueden clasificar en estáticas y dinámicas.

Características Estáticas. Podemos llamar características estáticas de un sensor o un sistema de medida aquellas propiedades que se derivan del comportamiento del sistema frente a señales o excitaciones externas que son constantes con el tiempo.

Algunas de estas características son; exactitud, resolución, histéresis, linealidad y sensibilidad, esta última en los acelerómetros cambia en función del tamaño del mismo dado el principio de masa vibrante que utiliza internamente. Ver figura 6, la mayoría de estas características son función de la carta de calibración del sensor.

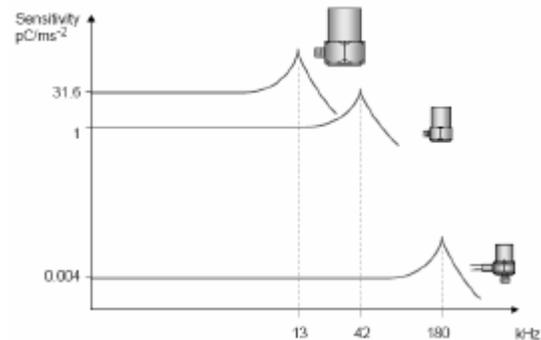


Fig. 6: Sensibilidad y rango de frecuencia de un acelerómetro en función de su tamaño [16]

Características Dinámicas. Definen la respuesta del sensor (la señal de salida) frente a una entrada variable con el tiempo. Para fijar un criterio se asume que esta variación temporal tiene una frecuencia superior a 2 Hz (en caso contrario se dice que la señal es estática)[10]. Unas de las principales características dinámicas son: velocidad de respuesta, respuesta frecuencial, estabilidad entre otras.

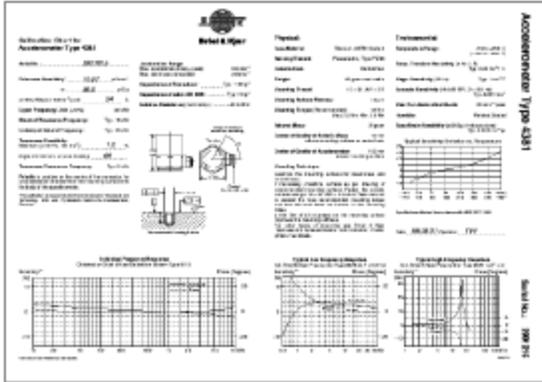


Fig. 7: Carta de calibración acelerómetro B&K 4381 [16]

Las características tanto estáticas como dinámicas del sensor es indispensable chequearlas antes, durante y después de realizados las medidas de vibraciones, ya que estas características se pueden ver afectadas por factores externos tales como, temperatura, campos magnéticos, tipo de montaje, entre otros y de este modo dar señales de medición erradas. La carta de calibración (ver figura 7) de un sensor es la presentación del mismo y por lo tanto un instrumento indispensable para conocer tanto las características estáticas como dinámicas del sensor y como estas se pueden ver afectadas por los factores arriba mencionados.

2.3 Acondicionamiento de señales de vibración

En primer lugar las señales no tienen gran interés en sí mismas si no nos es posible transmitir las y recibir las. Las señales, por tanto, están muy ligadas a la comunicación y su procesamiento es de vital importancia ya que está asociada de alguna manera al conocimiento o al significado de la información que llevan consigo.

La señal de salida que proporciona un sensor de vibración la mayoría de las veces no se puede analizar directamente, ya sea por su baja energía o por el tipo de unidad que utiliza o por la presencia de ruidos externos. Por lo tanto antes de analizarla es necesario procesar la señal (Muestrear, preamplificar y amplificar y finalmente filtrar).

Muestreo. Se puede definir el muestreo como la obtención de una señal discreta $x(n)$, donde n es un valor entero y que determina una cierta cantidad de puntos, a partir de una señal análoga o continua $c(t)$. Se puede escribir:

$$x(n) = c(nT), \text{ con } -\infty < n < \infty \quad (1)$$

Donde T es el periodo de muestreo, por que cada intervalo de tiempo T se toma una muestra de la señal continua. Se define frecuencia de muestreo (f_m) al inverso de este tiempo o periodo, $f_m = 1/T$, que se especifica en muestras por segundo o sus múltiplos. La conversión de la señal continua $c(t)$ a discreta $x(n)$ se realiza por medio de un convertidor análogo/digital (ADC) y puede ser realizada por el mismo sensor o un dispositivo externo.

Cuando se realiza el muestreo todas las frecuencias de la variable continua mayores a f_m se pierden. Por lo tanto cuando se requiere muestrear frecuencias mas elevadas se necesita una mayor f_m , pero la pregunta es ¿Qué tan mayor?

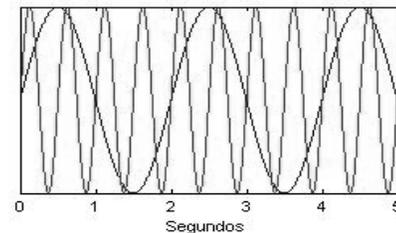


Fig. 8: Fenómeno de aliasing de una señal

El teorema de Nyquist reza, que si una variable continua $c(t)$ tiene un ancho de banda delimitado por f_s , Entonces $c(t)$ queda totalmente descrita por las muestras,

$$x(n) = c(nT) \text{ con } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty, \text{ si } f_m > 2f_s \quad (2)$$

A f_m se le llama frecuencia de Nyquist. Muestrear por debajo de f_m genera lo que en señales se conoce como aliasing. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 8 donde se observa la señal que se genera (color rojo) cuando se muestrea a $1/2$ Hz una señal de 2 Hz. En la práctica resulta que para hacer una correcta detección se debe muestrear a una tasa $f_m = 10f_s$. [10]

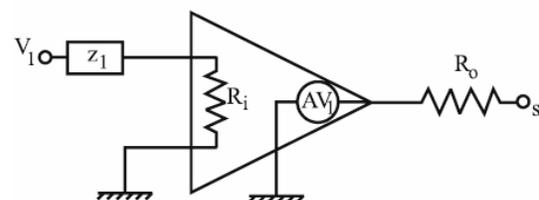


Fig. 9. Amplificador operacional

Preamplificar y amplificar. En la mayoría de los casos interesa muestrear a una tasa f_m con un orden de magnitud mayor que la frecuencia que se quiere detectar, pero el tiempo de apertura del sensor puede que no de para ello. Como el tiempo de apertura del sensor esta directamente relacionado con la amplitud de la señal, si se puede multiplicar la señal por un factor constante se puede aumentar el tiempo de muestreo. A eso se le denomina preamplificación. Dos condiciones se demandan de un amplificador la *linealidad* para que la señal no sea distorsionada, y la *rapidez* es decir el ancho de banda amplio de modo que se pueda incluir todas las frecuencias de interés.

Es importante que en la preamplificación o antes de amplificar se filtre la señal par evitar que señales de ruido se amplifiquen con la señal principal. Hoy en día los preamplificadotes más utilizados son de carga ya que los de voltaje se ven muy afectados por la longitud del cable [16]. Aprovechando la etapa de pre y amplificación se pueden incluir otros tipos de acondicionamiento como convertir intensidad a voltaje, filtrar ruido electrónico.

En el mercado el amplificador más comúnmente utilizado es el amplificador operacional, que es de corriente continua y que posee una entrada diferencial y una solo terminal de salida como el que se observa en la figura 9. Las características de un amplificador operacional ideal se pueden resumir en: ganancia (factor de amplificación) infinita, ancho de banda infinito, impedancia de entrada infinita, impedancia de salida nula y *offset* (error del cero) nulo.

Las señales de vibración obtenidas presentan ruidos, son de bajo nivel y alta impedancia y en el caso de los acelerómetros piezoeléctricos su unidad de salida es $\mu\text{C}/\text{m}\cdot\text{s}^2$, lo que conlleva a realizar una serie de pasos antes de llevar la señal a una instrumentación electrónica que se puede ver afectada por la entrada de parámetros fuera de su rango de funcionamiento. Estos cambios están incluidos como acondicionamiento de la señal.

Otro proceso importante en el acondicionamiento de señales de vibración es:

Filtrado de la señal: Un filtro es un sistema que, dependiendo de algunos parámetros, realiza un proceso de discriminación de una señal de entrada obteniendo variaciones en su salida. Los filtros digitales tienen como entrada una señal analógica o digital y a su salida tienen otra señal analógica o

digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro. En la Figura 10 se puede ver una señal en el tiempo y su FFT, con ruido y la misma señal después de ser filtrada para eliminar las componentes de alta frecuencia. En la FFT de la señal sin filtrar aparece una componente de frecuencia a un valor elevado (mayor a 100 y no esta en la grafica) que podría ocasionar diagnósticos errados para un inexperto en el análisis de señales.

El *filtrado digital* es parte del procesado de señal digital. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesado de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas [1].

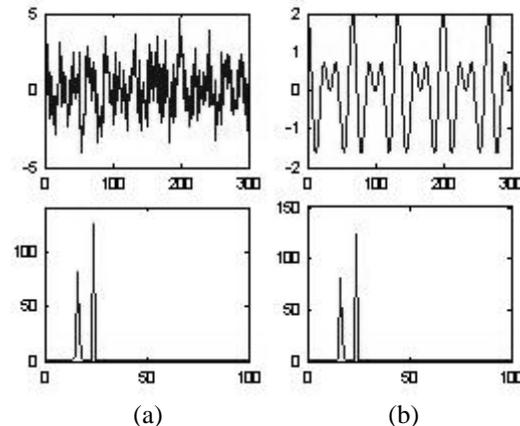


Fig. 10: a) Señal x con ruido y su FFT,
b) señal x filtrada y su FFT

La caracterización de los filtros se lleva a cabo con la *función de transferencia* (función que relaciona la entrada con la salida de una señal) como la que se puede observar en la carta de calibración de un acelerómetro (figura 7). Los filtros son utilizados en mediciones de vibración para separar señales o para remover componentes frecuenciales no deseadas.

Hay varios tipos de filtros así como distintas clasificaciones para estos filtros: De acuerdo con la parte del espectro que dejan pasar y que atenúan hay:

- Filtros pasa alto.
- Filtros pasa bajo.
- Filtros pasa banda.
 - ✓ Banda eliminada
 - ✓ Multibanda
 - ✓ Pasa todo

- ✓ Resonador
- ✓ Oscilador
- ✓ Filtro peine (comb filter)
- ✓ Filtro ranura (notch filter)

De acuerdo con su orden:

- Primer orden
- Segundo orden

De acuerdo con el tipo de respuesta ante entrada unitaria:

- FIR (*Finite Impulse Response*)
- IIR (*Infinite Impulse Response*)
- TIIR (*Truncated Infinite Impulse Response*)

Las señales que varían rápidamente tales como las de vibración requieren de un tipo de filtro conocido como filtro antialiasing. Un filtro antialiasing quita las frecuencias indeseable más altas, a la mitad de la frecuencia de muestreo, que pudieran conducir a medidas erróneas [11].

A la hora de realizar medidas de vibración sobre un sistema se necesita tener un conocimiento mínimo del funcionamiento del mismo y de los elementos que lo componen. La señal o señales a ser procesadas forman la *excitación* o *entrada* del sistema. La señal procesada es la *respuesta* o *salida del sistema*. Lo anterior con el fin de determinar intervalos posibles de la frecuencia de vibración y poder seleccionar los filtros adecuados.

3. ANALISIS DE VIBRACION

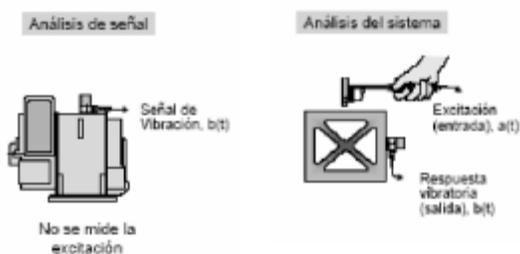


Fig. 11: Tipos de análisis de vibraciones en sistemas [16]

El análisis de vibraciones ha sido siempre una parte importante e imprescindible en el diagnóstico de fallas en maquinaria, cuando hacemos un análisis de señales, y en el comportamiento de sistemas cuando hacemos un análisis de respuesta temporal y/o frecuencial del sistema. Ver figura 11. En el uso del diagnóstico de falla el análisis de la señal responde a menudo a dos propósitos: para

investigar las características dinámicas de máquinas bajo diversos tipos de falla, y para conocer las características de la falla si esta ocurre y entonces identificar las causas de la misma. Hasta ahora, la técnica de la transformada de Fourier ha dominado en el campo del análisis de la señal debido a su valor y simplicidad. Sin embargo, hay algunas restricciones cruciales en su uso [17].

Hay diferentes niveles de análisis de señales de vibración, dependiendo de la aplicación que se requiera y pueden ir desde un simple conocimiento de la frecuencia a la que vibra un elemento mecánico o máquina, hasta un sistema inteligente para conocer, caracterizar, predecir y controlar el normal funcionamiento de un proceso [18].

Las señales de vibración analizadas en la vida diaria son en su mayoría aleatorias no estacionarias. El análisis de este tipo de señales se puede dividir en: respuesta frecuencial y respuesta temporal.

Análisis frecuencial: Se basa en la descomposición de una señal vibratoria, del tipo que siga, en componentes armónicas simples, representadas por su frecuencia, su amplitud, y la fase relativa entre ellas. Hay una técnica de análisis diferente por cada tipo de señal. A continuación se presenta el tipo de análisis a realizar en función del tipo de señal [9]. El siguiente cuadro muestra los desarrollos analíticos más comúnmente utilizados dependiendo del tipo de señal.

Tabla 1. Tipos de análisis para señales de vibración

Tipo de Señal	Tipo de análisis
Periódica	Descomposición en Series de Fourier
Transitoria	Densidad espectral de Energía
Aleatoria estacionaria	Densidad espectral de Potencia

Los desarrollos matemáticos no se presentan en este documento y queda a recomendación del encargado de hacer las pruebas de medición profundizar en el tema dependiendo del tipo de señal que se tenga y su aplicación.

En la práctica las soluciones matemáticas son útiles para conocer el tipo de análisis a ser aplicado, pero los avances en sistemas permiten que existan software especializados en este tipo de tareas. Lo anterior permite al estudioso de las vibraciones centrarse en seleccionar el software idóneo para el ensayo que se pretende desarrollar.

Los software existente exigen de quien los utiliza conocer el tipo de análisis que se implementa de lo contrario la interpretación de los resultados pueden ser erróneos.

Las señales no estacionarias son las más comunes en la vida diaria [13], por lo tanto la FFT aunque es de gran ayuda, se queda corta a la hora de comprender el comportamiento de este tipo de señales. Otras técnicas como la *Short Time Fourier Transform* (STFT) y la *Discret Wavelet transform* (DWT), permiten caracterizar mejor este tipo de señales.

La STFT es el método más usado para el estudio de señales no estacionarias, consiste en discretizar la señal en ventanas (intervalos) de tiempo y realizar a cada ventana la FFT, el método consiste en seleccionar adecuadamente este intervalo de tiempo. Se puede hacer intervalos de tiempo tan cortos como queramos?. La respuesta es no, por que después de alcanzar cierto intervalo mínimo la respuesta que se obtiene del espectro no tiene sentido y no muestra relación con el espectro de la señal original. Esto sería una limitación fundamental de la STFT [2].

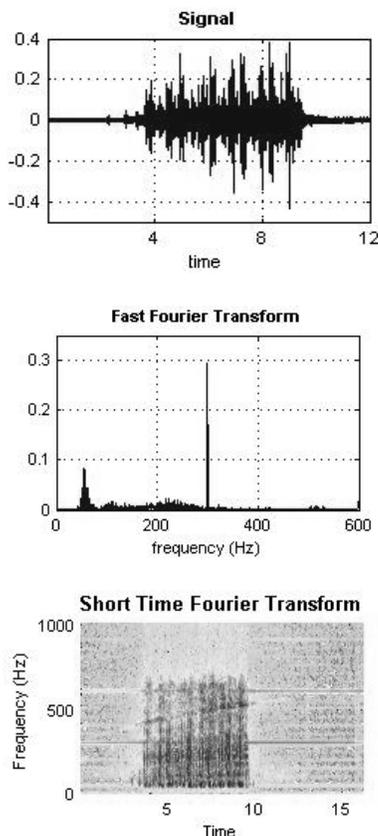


Fig. 12: Análisis de una señal vibratoria del paso de un tren

En la figura 12 se muestra la FFT y la STFT de una señal de vibración de paso de un tren. Se observa que mientras la FFT solo me permite observar las componentes de frecuencia de la señal, la STFT también nos dice en que momento se presentan dichas frecuencias.

La DWT también es utilizada en señales estacionarias [12,13,14]. aunque su principal aplicación es el análisis de imágenes. La STFT es un método bastante utilizado en el análisis de tiempo-frecuencia pero la WT ha ido ganando terreno en los últimos años dado que permite modificar la amplitud de la ventana (intervalo de tiempo) dependiendo del comportamiento de la señal para su análisis. Esto quiere decir que mientras en la STFT la ventana (intervalo de tiempo anizado) es constante y puede desperdiciar tiempo y análisis donde la señal no presenta cambios significativos, la DWT permite ir modificando dinámicamente la ventana (intervalo de tiempo) en función de los cambios significativos que presenta la señal, ahorrando tiempo, donde no se requiere gran resolución de análisis y mejorando la resolución en las partes donde se presenten gran cantidad de componentes de frecuencia.

4. CONCLUSIONES

El conocimiento de los principales parámetros en el análisis de señales de vibraciones, permite aprovechar al máximo las herramientas existentes, a fin de dar conceptos más precisos sobre las características de una falla y/o del comportamiento dinámico de un sistema.

Las características de los sensores de vibración tanto estáticas como dinámicas hacen del sensor un instrumento dentro del sistema de medición un punto débil o fuerte, según su selección sea la apropiada.

El análisis matemático que implícitamente tiene el análisis de señales no se explica en el presente trabajo por su largo y complicado desarrollo pero en futuros estudios según sea el caso de aplicación se detallarán.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Proakis, D. G. Manolakis. (1998), *Tratamiento Digital de Señales "Principios algoritmos y aplicaciones"*. Madrid, Prentice Hall.

- [2] Leon Cohen. (1995), *Time-Frequency Analysis*. New Jersey., Prentice Hall PTR.
- [3] Leonard Meirovitch. (1967), *Analytical Methods of Vibration*. New York NY: Macmillan Publishing Co.
- [4] S. Cardona., L. Jordi. (2006), *Vibracions Mecàniques "Descripció i anàlisi de magnituds en l'estudi de vibracions"*. Barcelona.
- [5] Y.M. Zhan, A.K.S. Jardine., (2005), *Adaptive autoregressive modeling of non-stationary vibration signals under distinct gear states. Part 1: modelling*, Journal of Sound and Vibration 286, pp:429–450
- [6] J. Morlier., F. Bos., P. Castéra., (2006), *Diagnosis of a portal frame using advanced signal processing of laser vibrometer data*, Journal of Sound and Vibration., 297, pp: 420–431
- [7] Harry N. Norton., (1984) *Sensores y analizadores*, Barcelona: Prentice-Hall,
- [8] Kenneth G McConnell, (1995), *Vibration testing: Theory and practice.*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Martinez Jordi. Notas de clase del curso "Vibraciones aleatorias 2004-2005" Doctorado en Ing. Mecánica, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [10] Montero G. Angel. *Sistemas de medida y adquisición de datos*. Universidad de Navarra. E 31080. Pamplona
- [11] Data Acquisition Toolbox., *For use with Matlab 7.0.2. User's guide*. March 2006 Fourth printing Revised for Version 2.9 (Release 2006a)
- [12] McHutchon M. A., Staszewski W. J. and Schmid, (2005), *Signal Processing for Remote Condition Monitoring of Railway Points.*, Blackwell Publishing Ltd., **41**, 71-85.
- [13] Caprioli A., Cigada A. and Raveglia D., (2005), *Rail inspection in track maintenance: A benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis.*, Mechanical Systeme and Signal Processing, 21, pp: 631-652.
- [14] Lanza di Scalea F., McNamara J., (2004), *Measuring high-frequency wave propagation in railroad traces by joint time-frequency analysis*, Journal of Sound and Vibration 273, pp:637-651.
- [15] Torben R. Licht. (1996) B&K, Technical Review N°1 *In Situ Verification of Accelerometer Function And Mounting*.
- [16] Rosendahls Bogtrykkeri., BP 1801. Mayo-2006, *Brüel& Kjør Calibration Services*. www.bksv.com/services/calibration.com.
- [17] Florez S. Elkin G. (1999), Tesis: *Vibraciones del sistema Poleas-Correa, producida por el desbalance de una polea*. Bogota, Uniandes.
- [18] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, M. Wu, H. Shih, N. Zheng, C. Yen, C.C. Tung, H.H. Liu, (1998), *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis*, Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences 454, pp: 903–995.
- [19] M. A. McHutchon, W. J. Staszewski and F. Schmid., (2005) *Signal Processing for Remote Condition Monitoring of Railway Points.*, Blackwell Publishing Ltd., Vol 41, pages:71–85
- [20] Iddings, Frank A. (1997) *Vibration analysis sensor*. American Soc for Nondestructive Testing., Volume 55, Issue 5, May, pp: 544-545. Columbus, OH, USA
- [21] C. Ovrén, M. Adolfsson and B. Hök., (1984), *Fiber-optic systems for temperature and vibration measurements in industrial application*. Optics and Lasers in Engineering Volume 5, Issue 3 , pp: 155-172
- [22] Fabien Claveau, Paul Fortie, Sylvain Lord, Denis Giiivlgras. (1996), *Mechanical vibration analysis using an optical sensor.*, Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference, Quebec, Volume 2, 26-29 May, pp:876 – 879.