

## 2 Conceptos de vibraciones

### 2.1 Vibraciones

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia.

La vibración es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes de la máquina vibrarán con distintas frecuencias y amplitudes. La vibración puede causar molestias y fatiga. A menudo es la última responsable de la "muerte" de la máquina. Además, muchas veces es un efecto molesto y destructivo de un proceso útil, aunque en otros casos es generada intencionadamente para desarrollar una tarea.

La vibración y el ruido, definido como sonidos no deseados, están estrechamente relacionados. El ruido es simplemente una parte de la energía de la vibración de una estructura que se transforma en variaciones de presión. La mayoría de los problemas de ruidos y vibraciones están relacionados con el fenómeno de la resonancia. Siempre va a existir algún nivel de ruido y de vibración en los procesos dinámicos. Las medidas de los ruidos pueden ser comparadas con los estándares internacionales para determinar si están dentro de unos límites aceptables. En algunos casos las medidas de vibraciones pueden ser comparadas con las especificaciones del fabricante de la máquina. Muy a menudo un problema de vibración de la máquina puede indicar un fallo o un mal funcionamiento en la misma.

Normalmente tiene su origen en los efectos dinámicos de las tolerancias de fabricación, rozamientos, fuerzas desequilibradas en elementos en rotación, el contacto entre elementos que están rodando, balanceando o deslizando, etc. A menudo, pequeñas vibraciones insignificantes pueden excitar las frecuencias de resonancia de otras partes de la estructura y pueden ser amplificadas a vibraciones mayores y pueden llegar a ser fuentes de ruidos.

Pero no siempre son nocivas e indeseadas, ya que algunas veces las vibraciones desarrollan un trabajo muy útil. Por ejemplo se generan intencionadamente en martillos neumáticos y algunas máquinas compactadoras.

### 2.2 Definiciones

Se dice que un cuerpo está vibrando cuando describe un movimiento oscilatorio en torno a una posición de equilibrio. El número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo se conoce como frecuencia, y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia es igual a la inversa del período. Multiplicando la frecuencia por  $2\pi$ , se obtiene la frecuencia angular, que es proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez  $k$  dividida entre la masa  $m$ . Un aumento de la masa en un sistema que se encuentra

vibrando produce un aumento del período, es decir, una disminución de la frecuencia. La amplitud de la vibración es la característica que describe la intensidad de la misma.

El valor de pico a pico indica la distancia entre el máximo y el mínimo valor alcanzados por la señal. Es un parámetro importante para aplicaciones en las que el desplazamiento vibratorio de una parte de la máquina es crítico para obtener las máximas tensiones o para consideraciones de rozamientos.

El valor de pico es el máximo que alcanza la curva, sin tener en cuenta el resto de la señal. Es particularmente útil para medir el nivel de golpes de corta duración.

El valor medio de la señal tiene en cuenta toda la señal y su interés práctico es muy reducido puesto que no guarda relación alguna con ninguna cantidad física de utilidad. Su expresión viene dada por:

$$\text{Valor medio} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2.2.1)$$

El valor RMS es la medida más relevante de la amplitud porque tiene en cuenta la historia de la señal y proporciona un valor que está directamente relacionado con el contenido energético de la vibración, y por tanto con su capacidad destructiva.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.2.2)$$

En la siguiente ilustración se representan estas cuatro últimas definiciones para una señal aleatoria.

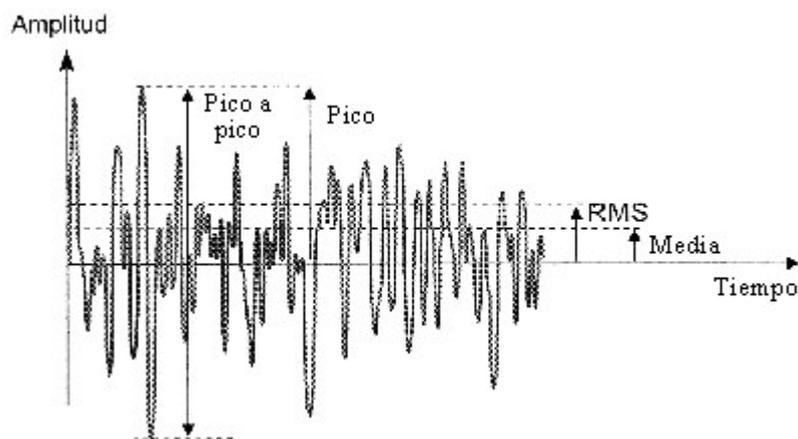


Figura 2.1 Valor de pico a pico, valor de pico, RMS y media para una señal aleatoria.

El factor de rizado es la relación entre el valor de pico y el valor RMS:

$$\text{Factor de rizado} = \frac{\text{Valor de pico}}{RMS} \quad (2.2.3)$$

La vibración puede tener una sola componente con una sola frecuencia o muchas componentes a diferentes frecuencias actuando simultáneamente. En la práctica, las señales de vibración están formadas por muchas frecuencias. El proceso de descomponer las señales de vibración en sus componentes individuales de frecuencia se conoce como análisis en frecuencia. El gráfico que muestra el nivel de vibración en función de la frecuencia se llama espectrograma. En la Figura 2.2 se muestra un espectrograma con cuatro picos. Observando la amplitud de la aceleración en el dominio del tiempo de un punto no se ve cuántas componentes hay y a qué frecuencias se encuentran. Sin embargo, si se transforma al dominio de la frecuencia se obtiene el espectro de aceleraciones, que suele presentar ciertas características que muestran que la energía se concentra en torno a unas pocas frecuencias. El análisis en el dominio de la frecuencia puede proporcionar en muchos casos información detallada sobre las fuentes que producen la señal.

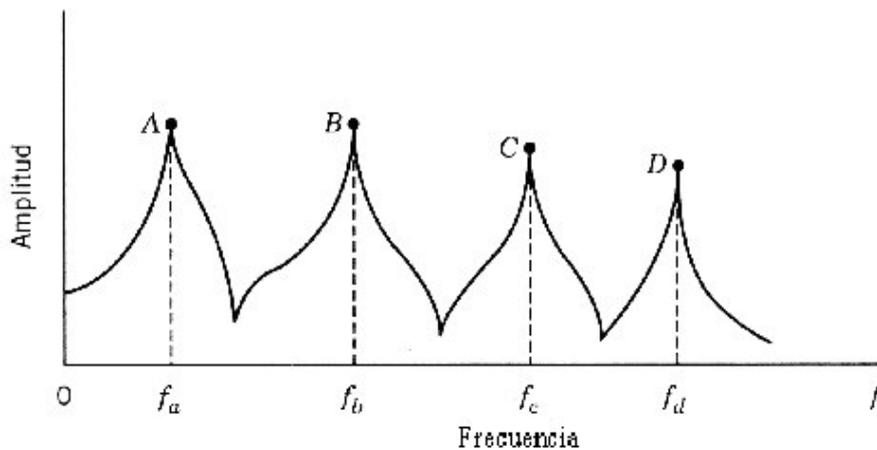


Figura 2.2 Espectro de frecuencias con cuatro picos.

Se define la función de respuesta en frecuencia (FRF) como la relación entre la salida (respuesta) y la entrada (excitación) de un sistema.

Las características modales de una estructura quedan definidas por sus frecuencias naturales, sus coeficientes de amortiguamiento y sus modos de vibración (se verá con más detalle en el Capítulo 5).

Las frecuencias naturales son aquellas que provocan que la estructura entre en resonancia. La resonancia significa amplificación, comparado con una carga estática de la misma magnitud, una carga oscilatoria puede producir respuestas uno o dos órdenes de magnitud mayores. Los valores de las frecuencias naturales están relacionados con los picos del espectro de aceleraciones.

Los coeficientes de amortiguamiento están relacionados con la disminución que se produce con el tiempo en cierta señal.

Los modos de vibración son un conjunto de deformadas de la estructura que se está analizando, que coinciden con las deformadas que experimenta la estructura al ser excitada con cada frecuencia natural.

### 2.3 Unidades y escalas de medidas

Los parámetros de las vibraciones se miden normalmente en unidades métricas de acuerdo con los requisitos ISO, que se muestran en la tabla adjunta. La constante gravitacional "g" es ampliamente utilizada para niveles de aceleración, aunque no pertenezca a dicho sistema de medidas.

Unidades según requisitos ISO	
Desplazamiento	m, mm, $\mu\text{m}$
Velocidad	m/s, mm/s
Aceleración	$\text{m/s}^2$

Tabla 2.1 Unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración que se deben emplear según la norma ISO.

Los tres parámetros mecánicos de desplazamiento, velocidad y aceleración están íntimamente relacionados para un movimiento oscilatorio. Si la vibración contiene una sola frecuencia, la forma y el período de la señal es la misma para la velocidad, desplazamiento y aceleración, estando las principales diferencias en un desfase temporal entre estas tres curvas y en sus amplitudes. Conociendo la señal de los desplazamientos, las otras pueden ser obtenidas mediante derivación de esta señal. O si se obtiene la aceleración de la vibración se pueden usar integradores electrónicos para obtener la señal de velocidad y de desplazamiento de la vibración. Como la integración es más sencilla que la derivación por métodos electrónicos, el mejor parámetro para medir es la aceleración (esta es una de las razones). Si se ignora la diferencia de fase, los valores numéricos de velocidad y aceleración pueden ser calculados fácilmente. Los valores de velocidad están relacionados con los de desplazamientos por medio de la frecuencia angular, al igual que los de aceleración con los de velocidad:

$$\begin{aligned} v &= D\omega \\ a &= v\omega \end{aligned} \tag{2.3.1}$$

En la medida de vibraciones se puede emplear la escala logarítmica y la lineal. Es importante poner siempre algún esfuerzo en elegir la mejor forma de presentar los resultados y los datos. La escala a utilizar depende de la unidad a medir. La distancia y el tiempo son unidades que típicamente se miden en escalas lineales.

La escala lineal para las frecuencias tiene la ventaja de que permite identificar fácilmente las componentes de la señal. Lo más simple es elegir una escala lineal con un rango que viene determinado por el rango de los datos adquiridos, pero a menudo esto no permite que los datos importantes se vean claramente. Por lo que algunas veces se usa la escala logarítmica.

La escala logarítmica tiene la ventaja de que puede cubrir un rango de frecuencias mucho más amplio, los números son más cómodos de manejar y cada década recibe la misma importancia. Si las componentes de las frecuencias más interesantes son pequeñas en comparación con el rango de la medida realizada es muy útil la escala logarítmica para las frecuencias. Además tiene la ventaja de comprimir el efecto de las fluctuaciones aleatorias en la señal, en la máquina y las debidas al ruido. Es conveniente recordar que la escala logarítmica no tiene cero. Al emplear la logarítmica, las bajas

frecuencias aparecen expandidas y las altas frecuencias comprimidas. Para representar magnitudes en las que la relación entre dos valores es más importante que el valor absoluto de ellos es recomendable utilizar dicha escala. El decibelio (dB) es la relación entre un valor y otro de referencia, y por tanto no tiene dimensiones. Pero este valor no se suele usar en la medida de vibraciones. Los valores de referencia recomendados para estandarizar los trabajos de vibraciones se muestran en la Tabla 2.2. El número de decibelios  $N$  viene dado por la siguiente expresión, donde  $a$  es el valor medido de la aceleración y  $a_{ref}$  es el valor de referencia.

$$N(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{a}{a_{ref}} \right) \quad (2.3.2)$$

Cantidad	Definición	Valor de referencia
Aceleraciones	$L_a = 20 \log_{10}(a/a_0)$ dB	$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$
Velocidades	$L_v = 20 \log_{10}(v/v_0)$ dB	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
Fuerzas	$L_F = 20 \log_{10}(F/F_0)$ dB	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$

Tabla 2.2 Valores de referencia para los decibelios según ISO R-1683.

## 2.4 Tipos de señales

En general, las señales dinámicas se pueden clasificar en deterministas y aleatorias.

Las señales deterministas son aquellas que se pueden describir mediante una relación matemática explícita. Las señales deterministas se pueden clasificar en periódicas y transitorias. Las periódicas se caracterizan por una repetición regular a lo largo del tiempo, por estar formadas por unas ciertas frecuencias, que siempre son las mismas, no varían con el tiempo, por ejemplo una señal sinusoidal.

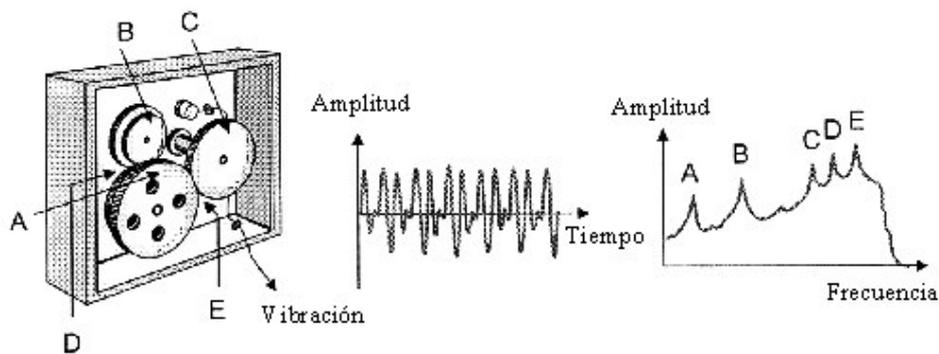


Figura 2.3 Ejemplo de señal determinista y periódica.

Las señales transitorias se definen como señales que comienzan y terminan en un valor constante, normalmente cero, en el dominio del tiempo. Por ejemplo las señales debidas a impactos.

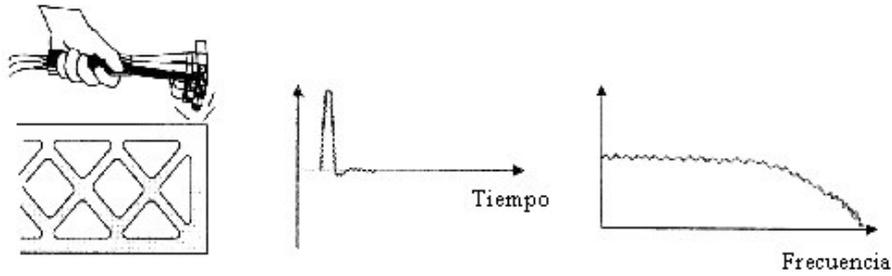


Figura 2.4 Ejemplo de señal transitoria.

Las aleatorias se caracterizan por ser señales cuyo valor instantáneo no puede ser predecido, pero que los valores pueden ser caracterizados por una cierta función de densidad de probabilidad. Produce un espectro amplio y continuo, conteniendo aproximadamente la misma energía en todas las frecuencias. Las señales aleatorias pueden dividirse en estacionarias y no estacionarias. Se dice que es estacionario si las distribuciones de probabilidad que caracterizan la señal no dependen del instante en que las mida.

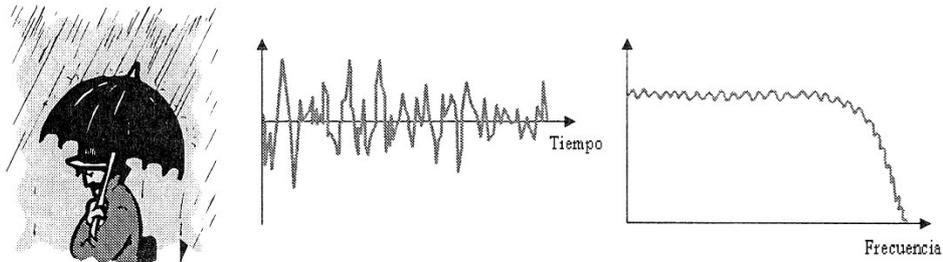


Figura 2.5 Ejemplo de señal aleatoria.

Para las señales aleatorias es necesario introducir el concepto de valor medio temporal:

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.3.3)$$

donde  $E[]$  es el valor medio o esperado,  $x$  es la variable cuyo valor medio se desea calcular,  $p(x)$  es su función de densidad de probabilidad y  $T$  es la duración del registro.

Se define la media de grupo para un instante  $t_1$  como se muestra a continuación:

$$E[x(t_1)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_i x_i(t_1) \quad (2.3.4)$$

donde  $n$  es el número de muestras tomadas.

Las señales aleatorias se pueden clasificar en ergódicas y no ergódicas. Se dice que una señal es ergódica si las medias temporales coinciden con las medias de grupo.

## 2.5 Utilidad de las vibraciones

La medida de las vibraciones se hace por varias razones (en el Capítulo 6 se describen con mayor detalle):

- para verificar que las frecuencias y las amplitudes no sobrepasan los límites que el material es capaz de soportar.
- para evitar las excitaciones que hacen que ciertas partes de una máquina entren en resonancia.
- para que sea posible conocer las fuentes de las vibraciones y poder aislarlas o amortiguarlas.
- para hacer un mantenimiento de las máquinas, ya que muchos de los problemas que pueden surgirle a las máquinas producen un incremento de los niveles de vibración, que pueden ser medidos en alguna superficie externa de la máquina y así actuar como indicador.
- para construir o verificar modelos de estructuras.

## 2.6 Las vibraciones y el cuerpo humano

Se conoce desde hace tiempo que los efectos de las vibraciones directas sobre el cuerpo humano pueden ser importantes. Los trabajadores sometidos a estas condiciones pueden experimentar pérdidas de equilibrio, fatiga, reducción del confort, pérdidas de concentración e incluso riesgos para la salud. En algunos casos, ciertas frecuencias y niveles de vibración pueden dañar órganos internos del cuerpo.

Es interesante saber que en la dirección longitudinal el cuerpo humano es más sensible a las frecuencias en el rango entre 4 y 8 hertzios, mientras que en la dirección transversal es más sensible a las frecuencias en el rango de 1 a 2 hertzios.