Tema 4: Introducción a la Teoría General de Vibraciones.

4.1 Introducción.

En el mundo estamos rodeados constantemente de fenómenos vibratorios que han desafiado al conocimiento del hombre desde el comienzo de los tiempos. El ruido que nos rodea, los zumbidos de la maquinaria industrial, el movimiento de una corriente eléctrica alterna, el funcionamiento de un motor de automóvil, la rotación de un motor eléctrico sobre sus cojinetes, el balanceo de un árbol con el viento, las olas del mar, el constante ascenso y descenso de las mareas, el movimiento del sol y la luna en torno a la Tierra, el día y la noche, las estaciones climáticas. El mismo cuerpo humano está lleno de fenómenos vibratorios: el latido del corazón, el movimiento de las cuerdas vocales al hablar y el de nuestros tímpanos al oir, tiritamos cuando tenemos frío, etc.

Todos esos fenómenos físicos conducen a variaciones cíclicas de las fuerzas y desplazamientos. Existe un esquema de movimiento que se repìte una y otra vez a lo largo del tiempo, (figura 4.1.). El estudio de estas variaciones cíclicas o periódicas, constituye el estudio de la vibración, y es uno de los campos de estudio más importantes de toda la física.

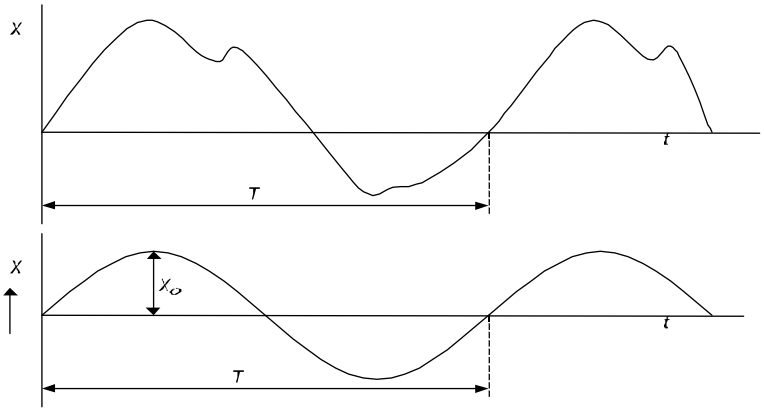

Figura 4.1. (a) Vibración periódica compleja. (b) Vibración periódica simple.

El estudio de las vibraciones se considera que pudo comenzar hace más de cuatrocientos años[1]. Sin embargo, los estudios modernos datan tan solo de 1894 cuando Rayleigh publica su monografía, *The Theory of Sound*[2]. La acústica y las vibraciones inicialmente se empezaron a estudiar por separado, y posteriormente se fueron solapando considerablemente. Sus fundamentos se encuentran en la fisica y matemática clásica. Sin embargo perdura una enorme actividad investigadora industrial y académica sobre las

[1] *Mechanical Vibration. Analysis, uncertainties, and control*. Haym Benaroya. Prentice Hall.
[2] Existe una edición de 1945, aún disponible, por la editorial Dover Publications in Long Island, NY. Otras dos obras interesantes sobre el tema son: *A History of Mechanics*, R. Dugas, Dover, 1968, y *History of Strength of Materials*, S. P. Timoshenko, Dover, 1983.

vibraciones. Cuando los ingenieros e investigadores alcanzan a comprender un fenómeno vibratorio, surgen nuevos problemas y aplicaciones que obligan a reconsiderar nuevos aspectos en la Teoría de Vibraciones.

Los problemas de vibración suelen ser complejos. Es fácil comprender el movimiento de un péndulo simple, pero la vibración de una máquina industrial puede resultar muy complicada de entender y analizar, pudiendo requerir años de investigación y estudios exhaustivos para llegar a su comprensión y conocimiento. Además, como en toda ciencia, al comprenderse y controlarse unos problemas, surgen otros nuevos e inesperados. También, con frecuencia, esos problemas se ocasionan por no más que pequeños cambios en los procedimientos de fabricación, leves errores de montaje, o el rediseño de pequeñas partes de la máquina o sistema.

Estudiaremos cierto número de aspectos de los movimientos periódicos, y con estas bases discutiremos los fenómenos de vibraciones en las máquinas. Empezaremos con una breve descripción puramente cinemática de las vibraciones. Después pasaremos a analizar algunas de las propiedades dinámicas de los sistemas en vibración, aquellas características dinámicas que nos permitan considerar el movimiento vibratorio como un problema físico real y no sólo como un ejercicio matemático. Partiendo de la teoría clásica sobre análisis de vibraciones iremos introduciéndonos en dos disciplinas muy recientes dentro del estudio de las vibraciones: *simulación dinámica de sistemas* y *control de vibraciones*.

Primeramente se empezará estudiando modelos deterministas simples, con uno y dos grados de libertad, que permiten definir y comprender de forma sencilla los sistemas vibratorios. Posteriormente, los conceptos estudiados se irán generalizando a sistemas más complejos con gran número de grados de libertad, llegando a comprender de manera progresiva la enorme complejidad de los sistemas mecánicos reales.

El objetivo principal es suministrar los conocimientos básicos sobre los métodos de estudio, análisis y aplicación de las vibraciones en las máquinas. Todo ello complementado con gran variedad de ejemplos y ejercicios que ayudan a comprender y fijar mejor las ideas o conocimientos.

Este primer capítulo sirve de introducción sobre los conceptos básicos que se irán estudiando y ampliando en los capítulos posteriores.

4.2. Concepto.

Desde un punto de vista amplio, se pueden considerar como vibraciones, las variaciones periódicas temporales de diferentes magnitudes relacionadas con el movimiento y las fuerzas o esfuerzos que aparecen en los sistemas físicos.

Específicamente, una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o de un cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio.

Al intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo de movimiento se le llama PERIODO de la vibración. El número de ciclos por unidad de tiempo define la FRECUENCIA del movimiento y el desplazamiento máximo del sistema desde su posición de equilibrio se llama AMPLITUD de la vibración.

El modelo de movimiento vibratorio más simple es el denominado Movimiento Armónico Simple, Figura 4.2.1. Como ejemplo de éste consideremos una partícula moviéndose de forma simétrica alrededor de la posición de equilibrio. La velocidad es máxima y la aceleración es cero cada vez que la masa pasa por su posición de equilibrio. En los desplazamientos extremos , la velocidad es nula y la aceleración es un máximo.

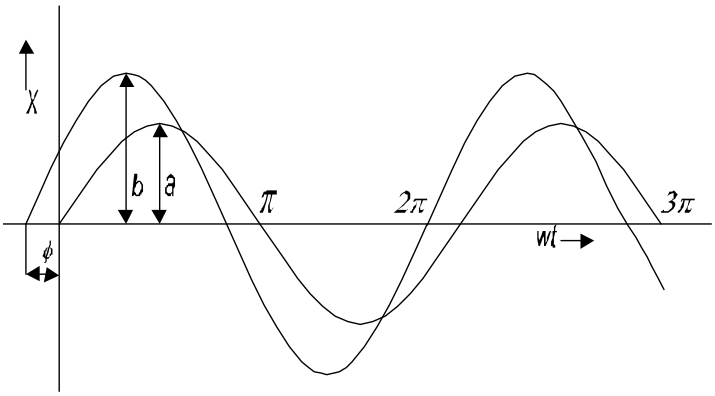

Figura 4.2.1.- Movimiento armónico simple.

Para representar visualmente el movimiento armónico simple se suele utilizar el diagrama vectorial mostrado en la figura 4.2.2. El desplazamiento x de la partícula es la suma de las proyecciones sobre el eje x de los dos vectores a y b, que giran alrededor del origen en una velocidad angular ω y en ángulo recto entre sí:

$$x = A\cos(\omega t) + Bsen(\omega t)$$

El desplazamiento angular de cualquiera de los vectores en cualquier momento t es θ = ωt. Este desplazamiento se mide a partir de las posiciones originales de los vectores a y b en el tiempo t = 0, en el eje vertical para el vector a y en el eje horizontal para el vector b. Las magnitudes A y B dependen de las condiciones iniciales del movimiento.

El movimiento llevado a cabo en cualquier periodo se llama un *ciclo.* Siendo el periodo τ el tiempo necesario para completar un ciclo de movimiento:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}$$

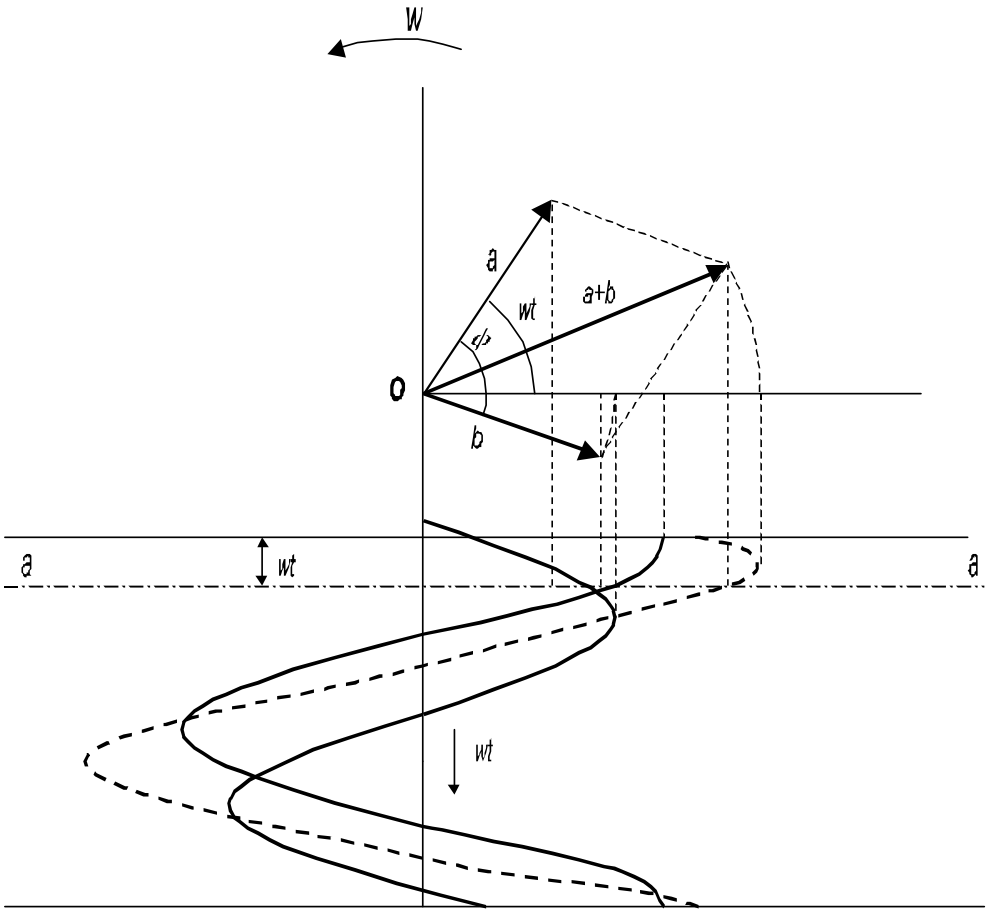

Figura 4.2.2.- Diagrama vectorial de representación de un movimiento armónico simple.

A veces es conveniente emplear la frecuencia de movimiento, es decir, el número de ciclos que se completa en cualquier unidad de tiempo:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

La unidad conveniente para la frecuencia es el Hertz (Hz) que es un ciclo por segundo (cps).

Para el estudio de la vibración armónica simple, estamos limitados a dos constantes arbitrarias, pero éstas no necesitan ser ambas amplitudes A y B. A veces es más conveniente pensar en términos de una amplitud total X, y de un ángulo de fase ϕ:

$$x = X \cos(\omega t - \phi)$$

4.3. Clasificación de las vibraciones.

Las vibraciones se pueden clasificar de varias maneras:

a) Por la causa o excitación que la provoca:

- Una ***vibración libre*** ocurre sin la aplicación de fuerzas por el exterior sobre el sistema. Por lo general, la vibración libre surge cuando se desplaza un sistema elástico respecto de su posición de equilibrio estable y después se deja *libre*, con lo cual el sistema tiende a volver a su posición de equilibrio estable, como consecuencia de la aparición de determinadas fuerzas restauradoras. A este tipo de vibración también se denomina *vibración natural*.

- Una ***vibración forzada*** ocurre con la aplicación de fuerzas exteriores sobre el sistema.

  Tanto las vibraciones libres como forzadas, pueden ser ***amortiguadas***, que es el término usado en el estudio de la vibración para denotar una disipación de energía.

b) Atendiendo a la forma del movimiento ondulatorio de las partículas, se distinguen :

- ***Vibraciones deterministas***, cuyo comportamiento se pueden expresarse exactamente mediante ecuaciones matemáticas, pues sus parámetros de comportamiento están totalmente determinados.

  Dentro de las vibraciones deterministas se distinguen las vibraciones ***periódicas*** y las no periódicas o ***transitorias***. Las primeras se repiten indefinidamente en el tiempo obedeciendo a comportamientos que se pueden expresar mediante funciones armónicas simples, (de tipo senoidal), o complejas, (series de Fourier). Las segundas se producen debido a excitaciones súbitas del sistema, y desaparecen transcurrido un determinado intervalo de tiempo.

- Y ***vibraciones aleatorias***, cuyo comportamiento no puede expresarse mediante ecuaciones matemáticas. En este caso, para su estudio se aplican técnicas estadísticas.

  Dentro de las vibraciones aleatorias se definen las vibraciones ***estacionarias***, cuyos parámetros de comportamiento se repiten en periodos de tiempo determinados ; y las ***no estacionarias*** en las cuales no se produce esa repetibilidad de parámetros.

c) Por el tipo de movimiento y deformaciones que aparecen en el sistema como conjunto, se distinguen :

- Vibraciones longitudinales. Las partículas describen trayectorias rectilíneas provocando deformaciones axiales según la dimensión dominante del sistema.

- Vibraciones flexionantes. La vibración de las partículas provoca deformaciones de flexión sobre el sistema.

- Vibraciones torsionantes La vibración de las partículas provoca deformaciones de torsión sobre el sistema.

d) Las vibraciones se clasifican también por el ***número de grados de libertad*** del movimiento, que son el número de coordenadas independientes que es necesario para describir por completo el movimiento.

e) Si las fuerzas disipativas son proporcionales a la velocidad del movimiento, las fuerzas de restauración proporcionales al desplazamiento, y las fuerzas de inercia proporcionales a la aceleración, se dice que una vibración es ***lineal***. Si no se satisface alguna de estas proporcionalidades, se dice que la vibración es ***no lineal***.
Esta terminología se ha tomado prestada de la ecuaciones diferenciales lineales y no lineales, que son las que emplearemos para plantear matemáticamente los problemas de vibraciones. La linealidad es importante ya que las ecuaciones diferenciales lineales pueden ser resueltas con mayor facilidad. La vibración no lineal, puede a veces linealizarse restringiendo el estudio del movimiento a vibraciones pequeñas.

4.4. Tratamiento de las vibraciones.

El estudio y análisis de las vibraciones puede tener diferentes objetivos:

A) Reducción del nivel, intensidad o severidad de las vibraciones. Esto se puede realizar mediante diferentes métodos:

1) Amortiguación de las mismas. Se trata de introducir elementos que disipen la energía asociada al movimiento vibratorio, de manera que dicha vibración tiende a desaparecer o se reduce su nivel o intensidad.

2) Absorción. Se colocan determinados elementos que entran en vibración con la máquina. Estos elementos absorben la energía de la vibración de la máquina. Esta reduce su nivel de vibración a costa de aumentar el nivel de vibración del elemento absorsor.

3) Aislamiento. Se trata de, sin necesidad de reducir el nivel de vibración de la máquina, sí evitar que la vibración se propague a determinados elementos de la misma o del entorno. Para esto se instalan elementos con materiales aislantes de las vibraciones.

B) Aprovechamiento. Se trata de aplicar el conocimiento del fenómeno de las vibraciones en el diseño de máquinas y mecanismos, generando determinados movimientos vibratorios que son beneficiosos para la utilidad o trabajo deseado. Por ejemplo:

1) Mesas vibrantes, para ensayo de componentes de máquinas.

2) Cintas transportadoras.

3) Máquinas vibradoras para apisonado de suelos o cimentaciones.

4) Tolvas.

5) ……