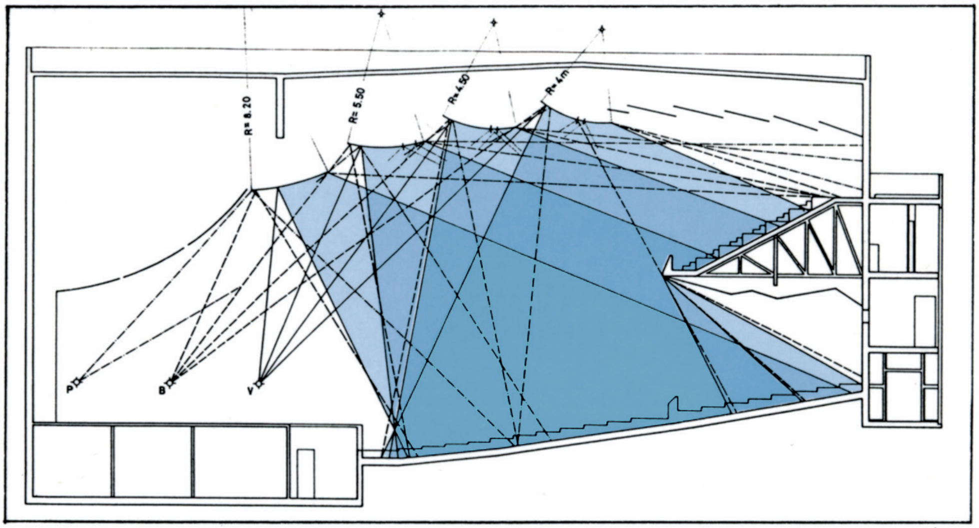
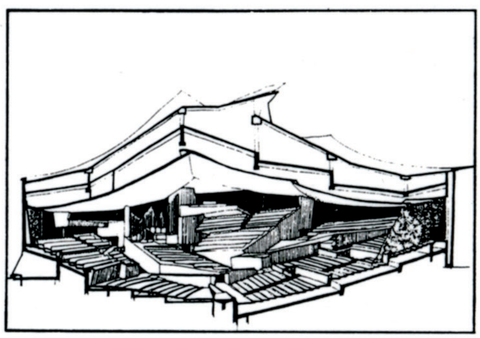
ACUSTICA
ARQUITECTONICA Y URBANISTICA



J. LLINARES
A. LLOPIS
J. SANCHO



EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Fco. Javier Sancho Vendrell
Llinares Galiana
Ana Llopis Reyna

ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA Y URBANÍSTICA

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Primera edición, 1990
Primera edición, 1996 ▪ reimpresión, 2011

Distribución: pedidos@editorial.upv.es
Tel. 96 387 70 12

Imprime: Byprint Percom sl.

ISBN: 978-84-7721-441-0
Depósito Legal: V-1529-2011
Ref. editorial: 640

Impreso en España

I n d i c e

Capítulo III: Acústica Física.

Capítulo IV: Acústica Fisiológica.

Capítulo V: Acústica Arquitectónica.

Capítulo VI: Acústica Geométrica.

Capítulo VII: Acústica Ondulatoria.

Capítulo VIII: Absorción acústica.

Capítulo IX: Acústica Estadística.

Capítulo X: Parámetros de calidad en la acústica de salas.

Capítulo XI: Aislamiento acústico. Parámetros de medida.

Capítulo XII: Fuentes de ruido en los edificios.

Capítulo XIII: Aislamiento a ruido aéreo.

Capítulo XIV: Transmisión de los ruidos de impacto y vibraciones.

Capítulo XV: Acústica Urbanística.

Capítulo XVI: Evaluación del impacto ambiental.

P r ó l o g o

El objetivo que se ha pretendido durante todo el proceso de elaboración del presente libro es el de desarrollar de forma sencilla, en base a unos principios físicos fundamentales, las teorías que en esta especialidad se utilizan, tanto en edificación como en urbanismo.

Su contenido se presenta en los cuatro bloques siguientes:

Los cuatro primeros capítulos establecen los conceptos y teorías físicos necesarios para tratar las magnitudes que intervienen en el campo acústico, así como la percepción de las mismas por nuestro oído.

El segundo bloque que comprende los capítulos del quinto al décimo (ambos inclusive), exponen las técnicas y métodos que usualmente se utilizan en el acondicionamiento acústico de salas.

Del capítulo once al catorce (ambos inclusive) se plantea la problemática del aislamiento, tanto a ruido aéreo como a impacto, abordando sus soluciones de forma más directa mediante el empleo de expresiones, algunas de ellas empíricas, normalmente utilizadas en este tipo de intervenciones.

Los dos últimos capítulos se dedican a Acústica Urbanística, en la que se incluye la evaluación del impacto ambiental.

A lo largo de todo el libro se ha intentado conjugar el necesario rigor de los planteamientos teóricos con la conveniente simplicidad que exige la práxis cotidiana.

Agradecemos a los profesores Belmar y Estellés de la E.T.S.I. de Telecomunicación sus aportaciones en los temas dedicados a Acústica Ambiental, sobre los cuales han venido trabajando durante mucho tiempo.

Asimismo queremos expresar nuestro reconocimiento al profesor Gómez de la E.T.S. de Arquitectura por sus acertadas precisiones en la actual revisión.

Los autores

Capítulo I

Movimiento Armónico Simple

1.1. Introducción.

Para estudiar los fenómenos acústicos en la edificación es imprescindible establecer unos conceptos físicos básicos sobre los cuales, posteriormente, se desarrolla toda la teoría. Así, las ondas sonoras exigen el estudio previo del movimiento ondulatorio y sus fenómenos de propagación en un medio. Del mismo modo, puesto que la onda en general transmite una vibración y la forma más simple de ésta es la denominada armónica, parece aconsejable empezar por un capítulo dedicado al estudio del movimiento armónico simple, y sobre todo, de aquellas partes o aspectos del mismo que pueden interesar en el desarrollo teórico posterior.

Se dice que un punto, o en general un sistema de puntos, realiza un movimiento periódico cuando sus parámetros cinemáticos y dinámicos toman valores idénticos a intervalos regulares de tiempo denominados periodos.

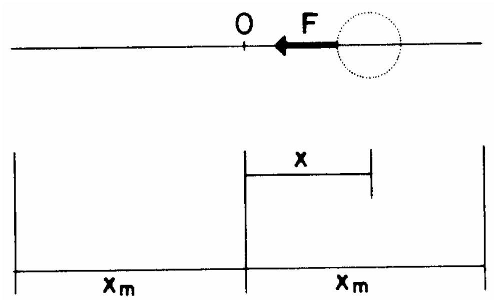


Figura 1.1: Fuerza que actúa sobre una partícula en un movimiento armónico simple.

En los movimientos periódicos de tipo oscilatorio o vibratorio, la partícula tiene una posición de equilibrio y cuando se desplaza de la misma, surge una **fuerza restauradora** o recuperadora que le hace experimentar un movimiento de vaivén respecto a la citada posición de equilibrio. El movimiento vibratorio más sencillo, es el armónico simple, en el cual la fuerza que actúa sobre la partícula es proporcional, en cada instante, a la distancia que la separa del origen o posición de equilibrio.

En otros casos, la función que relaciona la fuerza y el desplazamiento es más compleja, aunque se puede considerar que para desplazamientos pequeños, las fuerzas restauradoras son siempre proporcionales al desplazamiento, ya que desarrollando en serie de Mc-Laurin la función $F(x)$ que representa a cualquier tipo de fuerza recuperadora dependiente de la posición alrededor de la de equilibrio, resulta:

$$F(x)=F(0)+\left[\frac{dF}{dx}\right]_{x=0} x+\left[\frac{d^2F}{dx^2}\right]_{x=0} \frac{x^2}{2\,!}+\left[\frac{d^3F}{dx^3}\right]_{x=0} \frac{x^3}{3\,!}+\cdots$$

con lo que para valores suficientemente pequeños de x (desplazamientos elementales) quedaría:

$$F(x)=\left[\frac{dF}{dx}\right]_{x=0} x=K\,x$$

ya que $x^2,\, x^3 \cdots$ son infinitésimos despreciables respecto a x y $F(0)=0$, por ser el origen el punto de equilibrio.

Podemos concluir que todas la vibraciones tienen carácter armónico simple cuando los desplazamientos que se producen son suficientemente pequeños.

Por otra parte, según el teorema de Fourier, todo movimiento periódico puede considerarse como una suma de movimientos armónicos elementales. De ahí la importancia de estudiar el movimiento armónico simple.

1.2. Movimiento Armónico simple. Definición y parámetros.

El movimiento vibratorio más elemental es el denominado **armónico simple**, y se define como aquel que posee un punto cuya distancia a la posición de equilibrio estable viene dada por la ecuación:

$$x=x_m\ \mathrm{sen}(\omega t+\varphi_0) \tag{1.1}$$

A la cantidad $(\omega t+\varphi_0)$ se le denomina **fase** del movimiento y su valor φ_0, correspondiente al instante inicial $(t=0)$, es la fase inicial. Si como fase inicial se toma $\beta_0=\varphi_0-\pi/2$, por ser,

$$\mathrm{sen}(\omega t+\varphi_0)=\cos\left(\omega t+\varphi_0-\frac{\pi}{2}\right)$$

la (1.1) se puede expresar como:

$$x=x_m\cos\left(\omega t+\varphi_0-\frac{\pi}{2}\right)=x_m\cos(\omega t+\beta_0) \tag{1.2}$$

Al desplazamiento x se le denomina **elongación** y a la elongación máxima de la partícula, $x = \pm x_m$, se le llama **amplitud** del movimiento armónico simple. Se denomina **periodo**, T, al intervalo de tiempo mínimo entre dos posiciones idénticas de la partícula que posean la misma velocidad. Como la velocidad de la partícula viene dada por:

$$\dot{x} = +x_m \,\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \tag{1.3}$$

la igualdad de $x(t)$ y $x(t+\Delta t)$, así como de $\dot{x}(t)$ y $\dot{x}(t+\Delta t)$ exige que:

$$\omega(t+\Delta t) + \varphi_0 - (\omega t + \varphi_0) = 2n\pi$$

de donde, como el periodo es el menor intervalo de tiempo, $(n=1)$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{1.4}$$

Se puede, de acuerdo con ésto, definir el periodo como el tiempo que tarda la partícula en realizar una oscilación completa.

La **frecuencia** f es el número de vibraciones completas por unidad de tiempo, es por tanto la inversa del periodo. La unidad en el sistema internacional (SI) es el ciclo por segundo que se denomina Hertz ($1\,Hz = 1\,s^{-1}$).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Esta identificación de parámetros hace posible y sencilla la representación del movimiento armónico simple de una partícula mediante la proyección sobre un diámetro, del movimiento circular uniforme de un punto que describe una circunferencia de radio la amplitud del movimiento armónico, con una velocidad angular constante ω. Es decir que elegido como diámetro el horizontal y como fase inicial la φ_0, la distancia al centro O de la proyección de P sobre el diámetro, coincide con la definición de movimiento armónico dada en (1.1).

El tiempo que tarda el punto P en dar una vuelta completa (2π) es el periodo T. Luego ω es la velocidad angular de giro del punto P, denominada **pulsación** o frecuencia angular. El vector de posición de dicho punto posee de módulo la amplitud del movimiento y gira con velocidad angular ω, por lo que se suele denominar vector giratorio.

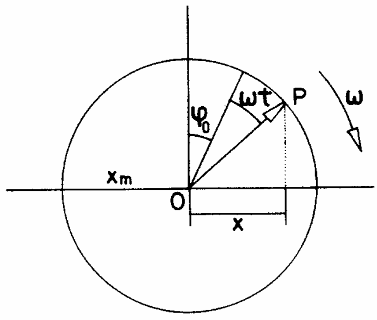


Figura 1.2: Representación gráfica de los parámetros del movimiento armónico simple.

En cuanto a la aceleración del movimiento armónico simple se obtiene derivando respecto al tiempo la velocidad dada por (1.3):

$$\ddot{x}=-x_m\,\omega^2\ \mathrm{sen}(\omega t+\varphi_0)=-\omega^2\,x \tag{1.6}$$

La aceleración es pues, proporcional y opuesta al desplazamiento o elongación.

En consecuencia, las tres variables que representan al movimiento (elongación, velocidad y aceleración) en función del tiempo resultan:

$$x=x_m\ \mathrm{sen}(\omega t+\varphi_0)$$

$$x_0=x_m\ \mathrm{sen}\,\varphi_0$$

$$x_{MAX}=\pm\,x_m$$

$$\dot{x}=x_m\ \omega\cos(\omega t+\varphi_0)=$$

$$=x_m\ \omega\,\mathrm{sen}\left(\omega t+\varphi_0+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\dot{x}_0=x_m\ \omega\cos\varphi_0$$

$$\dot{x}_{MAX}=\pm\,x_m\ \omega$$

$$\ddot{x}=-x_m\ \omega^2\ \mathrm{sen}(\omega t+\varphi_0)=$$

$$=-\,\omega^2\,x$$

$$\ddot{x}_0=-\,\omega^2\ x_0$$

$$\ddot{x}_{MAX}=\mp\,x_m\ \omega^2$$

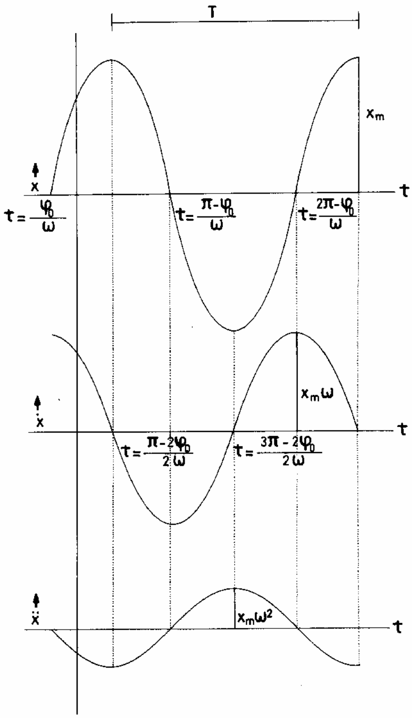


Figura 1.3: Variación temporal de la elongación, velocidad y aceleración en un movimiento armónico simple.

1.3 Dinámica del movimiento armónico simple.

La cinemática del m.a.s. estudiada en el apartado anterior, permite, mediante la aplicación de la ecuación fundamental de la dinámica, obtener la fuerza que actúa sobre la partícula.

En efecto, suponiendo que el movimiento de la partícula se realiza sobre el eje *OX* y que la posición de equilibrio coincide con el origen del sistema, al proyectar sobre dicho eje, teniendo en cuenta la expresión de la aceleración dada en (1.6), resulta:

$$F=-m\omega^2 x_m \operatorname{sen}(\omega t+\varphi_0)=-m\omega^2 x$$

Siendo m la masa de la partícula y ω la pulsación del movimiento. A la constante, $K=m\omega^2$, se le denomina **constante elástica** y viene relacionada con el periodo T mediante:

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$$

Luego:

$$F=-Kx \tag{1.7}$$

Esta fuerza va dirigida hacia el origen tratando de llevar a la partícula a su posición de equilibrio estable, existiendo una atracción continua de la partícula por parte del origen de coordenadas. Cuando la partícula alcanza el centro, la fuerza restauradora ha disminuido hasta cero, pero debido a la velocidad adquirida, ésta rebasa la posición de equilibrio y continúa moviéndose. Tan pronto como ha sobrepasado dicha posición de equilibrio, la fuerza entra de nuevo en acción, aunque la rapidez del movimiento disminuye en una proporción que aumenta con la distancia hasta que se detiene, siendo en este instante máxima la fuerza que lo atrae nuevamente hacia el origen.

Recíprocamente, partiendo de una fuerza que es en todo instante proporcional y de sentido contrario al desplazamiento, veamos que dicha fuerza origina en una partícula el movimiento definido por (1.1).

Utilizando la ecuación fundamental de la dinámica,

$$F=-Kx=m\frac{d^2x}{dt^2}$$

llamando $K/m = \omega^2$ obtenemos:

$$\frac{d^2 x}{d t^2} + \omega^2 x = 0$$

ecuación diferencial lineal de segundo orden cuya integración da soluciones del tipo:

$$x = x_m \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

siendo x_m y φ_0 constantes.

La constante ω^2 recibe el nombre de **constante armónica**.

1.4 Energía del movimiento armónico simple.

La energía cinética de una partícula que se mueve con un movimiento armónico simple se obtiene sustituyendo en la expresión general de la energía cinética el valor de la velocidad dado en (1.3), es decir:

$$E_C = \tfrac{1}{2} m (\dot{x})^2 = \tfrac{1}{2} m x_m^2 \, \omega^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0) \tag{1.8}$$

La energía potencial desarrollada por la fuerza conservativa $F = -K x$ será:

$$-dU = \vec{F} \cdot \overrightarrow{dr} = -K x \, dx$$

$$U = \int_0^x K u \, du = \tfrac{1}{2} K x^2 = \frac{K}{2} x_m^2 \operatorname{sen}^2(\omega t + \varphi_0)$$

Teniendo en cuenta que la constante elástica K es igual a $m\omega^2$, resulta:

$$U = \tfrac{1}{2} m \omega^2 x_m^2 \operatorname{sen}^2(\omega t + \varphi_0) \tag{1.9}$$

La energía total de la partícula en cualquier instante resulta:

$$E = E_C + U = \frac{m}{2} x_m^2 \, \omega^2 \left(\cos^2(\omega t + \varphi_0) + \operatorname{sen}^2(\omega t + \varphi_0) \right)$$

$$E = \frac{m \omega^2 x_m^2}{2} = cte \tag{1.10}$$

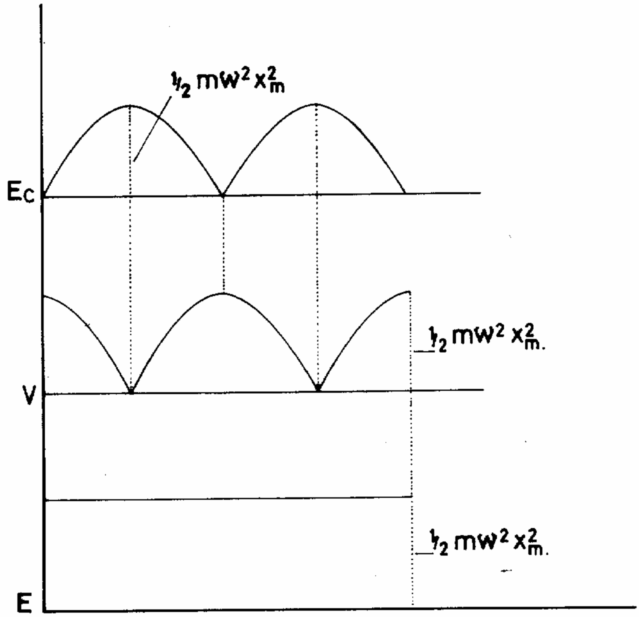


Figura 1.4: Variación temporal de la energía cinética y potencial en un movimiento armónico simple.

Luego la energía mecánica total que posee la partícula en cada instante se mantiene constante a lo largo del movimiento, existiendo una trasvase continuo de energía cinética a potencial y viceversa. La energía potencial aumenta con el cuadrado de la elongación,

$$U = \frac{1}{2} K x^2$$

y la cinética con el cuadrado de la velocidad,

$$E_C = \frac{1}{2} m (\dot{x})^2$$

La energía potencial es máxima en los extremos del recorrido $x = \pm x_m$ en donde es nula la velocidad y por tanto también la energía cinética.

La energía cinética es máxima en el origen donde la velocidad es máxima y es nula la elongación y por tanto, también la energía potencial.

$$(E_C)_{MAX} = (U)_{MAX} = E = \frac{m\omega^2 x_m^2}{2}$$

1.5 Composición de movimientos armónicos simples de igual dirección y frecuencia.

Supongamos una partícula sometida simultáneamente a dos movimientos armónicos simples de igual dirección y frecuencia, difiriendo ambos, en principio, en su amplitud y su fase. En un instante t las elongaciones de ambos movimientos serán:

$$x_1 = x_{m_1} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1)$$
$$x_2 = x_{m_2} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_2)$$

con $\omega = 2\pi f$

La elongación resultante de la superposición de estos dos movimientos será en cada momento la suma de las elongaciones respectivas:

$$x = x_1 + x_2 = x_{m_1} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + x_{m_2} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_2) =$$

$$x_{m_1} \operatorname{sen}\omega t \cos\varphi_1 + x_{m_1} \cos\omega t \operatorname{sen}\varphi_1 + x_{m_2} \operatorname{sen}\omega t \cos\varphi_2 + x_{m_2} \cos\omega t \operatorname{sen}\varphi_2 =$$

$$= \operatorname{sen}\omega t\left(x_{m_1} \cos\varphi_1 + x_{m_2} \cos\varphi_2\right) + \cos\omega t\left(x_{m_1} \operatorname{sen}\varphi_1 + x_{m_2} \operatorname{sen}\varphi_2\right)$$

llamando a,

$$\begin{aligned} x_{m_1}\cos\varphi_1 + x_{m_2}\cos\varphi_2 &= x_m\cos\varphi \\ x_{m_1}\operatorname{sen}\varphi_1 + x_{m_2}\operatorname{sen}\varphi_2 &= x_m\operatorname{sen}\varphi \end{aligned} \qquad [1]$$

resulta:

$$x = x_m \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \qquad (1.11)$$

en donde x_m y φ se obtienen de resolver el sistema $[1]$:

$$tg\ \varphi = \frac{x_{m_1}\operatorname{sen}\varphi_1 + x_{m_2}\operatorname{sen}\varphi_2}{x_{m_1}\cos\varphi_1 + x_{m_2}\cos\varphi_2}$$

$$(1.12)$$

$$x_m^2 = x_{m_1}^2 + x_{m_2}^2 + 2\, x_{m_1}\, x_{m_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Luego el movimiento resultante, también es armónico simple de la misma frecuencia y dirección que los movimientos componentes y con una amplitud y fase dependiente de las amplitudes y fases de los movimientos superpuestos (1.12).

El vector giratorio que lo representa es pues la suma de los vectores giratorios de los dos movimientos superpuestos, como se observa en las ecuaciones del sistema [1].

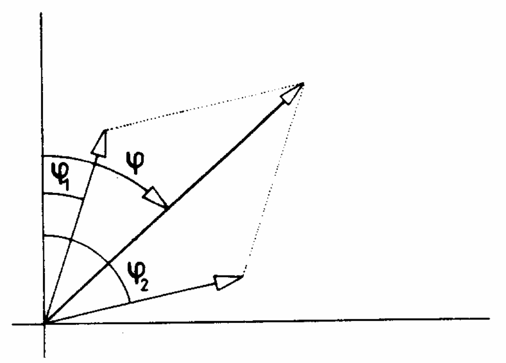


Figura 1.5: Composición de movimientos armónico simples de igual dirección y frecuencia. Suma de sus vectores giratorios

Esto se puede generalizar para el caso de superposición de n movimientos armónicos simples de igual dirección y frecuencia. El vector giratorio resultante será la suma de los n vectores giratorios de los movimientos componentes.

En este caso,

$$x_i = x_{m_i} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_i) \qquad i\,(1 \cdots n)$$

$$x = \sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_i)$$

$$x = \sum_{i=1}^{n} \left(x_{m_i} \operatorname{sen}\omega t \cos\varphi_i + x_{m_i} \cos\omega t \operatorname{sen}\varphi_i \right) =$$

$$= \operatorname{sen}\omega t \sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \cos\varphi_i + \cos\omega t \sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \operatorname{sen}\varphi_i$$

llamando,

$$\sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \cos\varphi_i = x_m \cos\varphi \qquad \sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \operatorname{sen}\varphi_i = x_m \operatorname{sen}\varphi$$

quedaría:

$$x = x_m \operatorname{sen}(\omega t + \varphi)$$

siendo por lo tanto el movimiento resultante armónico simple de igual dirección y frecuencia y con una amplitud y fase que se obtienen de resolver el sistema anterior,

$$tg\ \varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \operatorname{sen} \varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} x_{m_i} \cos \varphi_i}$$

$$x_m^2 = \sum_{i=1}^{n} x_{m_i}^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_{m_i}\, x_{m_j} \cos\left(\varphi_i - \varphi_j\right) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_{m_i}\, x_{m_j} \cos\left(\varphi_i - \varphi_j\right) \quad (i \neq j)$$

Vamos a considerar los casos particulares de superposición de movimientos en igualdad de fase $\varphi_2 = \varphi_1$, oposición de fase $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi$ y cuadratura de fase $\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2}$, por su importancia y utilidad.

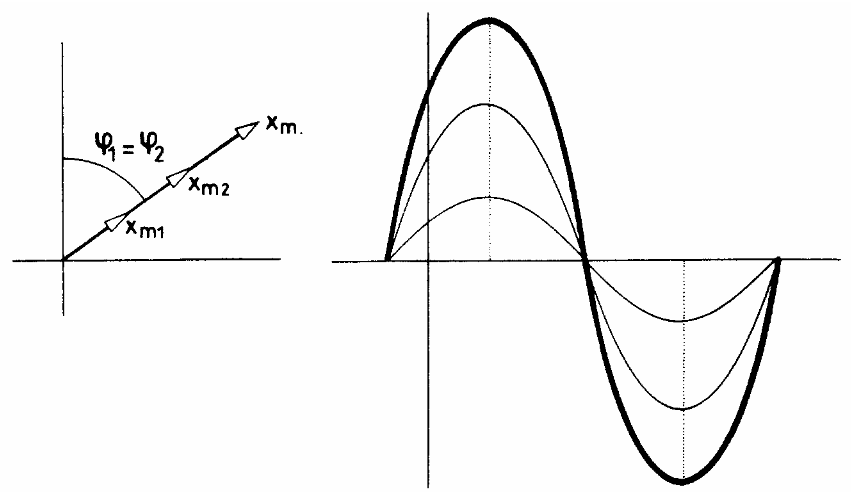


Figura 1.6: Composición de movimientos armónico simple de igual dirección y frecuencia, estando en fase.

Se dice que dos movimientos están **en fase** cuando:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$$

$$x_m^2 = x_{m_1}^2 + x_{m_2}^2 + 2\, x_{m_1} x_{m_2} \ ; \quad x_m = x_{m_1} + x_{m_2}$$

La fase inicial del movimiento resultante coincide con la fase común de los movimientos componentes y la amplitud resultante es la suma de las amplitudes de los componentes,

$$x = \left(x_{m_1} + x_{m_2} \right) \operatorname{sen}(\omega t + \varphi)$$

Se dice que dos movimientos estan **en oposición de fase** cuando la diferencia entre las fases es π,

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{m_1} \operatorname{sen}\varphi_1 + x_{m_2} \operatorname{sen}(\varphi_1 + \pi)}{x_{m_1} \cos\varphi_1 + x_{m_2} \cos(\varphi_1 + \pi)} = \frac{x_{m_1} - x_{m_2}}{x_{m_1} - x_{m_2}} \operatorname{tg} \varphi_1$$

$$x_m^2 = x_{m_1}^2 + x_{m_2}^2 - 2\, x_{m_1} x_{m_2} = \left(x_{m_1} - x_{m_2} \right)^2 x_m = x_{m_1} - x_{m_2}$$

La fase inicial del movimiento resultante es la correspondiente al de mayor amplitud y la amplitud resultante es la diferencia de amplitudes.

$$x = \left(x_{m_1} - x_{m_2} \right) \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1)$$

En caso de que las amplitudes fueran iguales, el movimiento resultante es nulo.

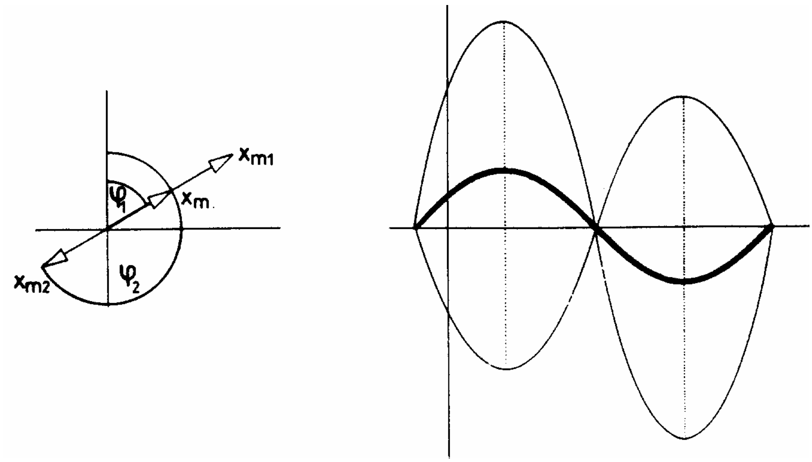


Figura 1.7: Composición de movimientos armónico simples de igual dirección y frecuencia, en oposición de fase.

Para seguir leyendo haga click aquí