

Índice general

Introducción	1
I Mecánica	3
1. Sistemas de unidades. Dimensiones físicas	5
1.1. El Sistema Internacional de Unidades (S.I.)	6
1.2. Escalas características. Leyes de escala	8
2. Cinemática	17
2.1. Magnitudes escalares y vectoriales. Vectores	18
2.2. Velocidad y aceleración	20
2.2.1. Movimiento en dos dimensiones	25
2.2.2. Movimiento circular	27
2.3. Movimiento relativo. Sistemas de referencia	28
2.4. Campos escalares y vectoriales	31
3. Dinámica	41
3.1. Leyes de Newton	42
3.2. Cantidad de movimiento o momento lineal. Centro de masas	44
3.3. Momento angular. Momento de una fuerza	45
3.3.1. Sólido rígido	49
3.4. Trabajo y energía	49
3.5. Energía potencial. Conservación de la energía	51
3.6. Campo gravitatorio	53
3.6.1. Movimiento en el campo gravitatorio terrestre	54
3.7. Rozamiento y fricción viscosa	56
3.7.1. Rozamiento	57
3.7.2. Fricción en fluidos	59
3.8. Sistemas no inerciales	60

II	Vibraciones y Ondas	71
4.	Oscilaciones	73
4.1.	Introducción	74
4.2.	Movimiento armónico simple	75
4.2.1.	Ecuación de movimiento	75
4.2.2.	Energía del movimiento armónico	78
4.2.3.	Otros sistemas con movimiento armónico simple	80
4.3.	Oscilaciones amortiguadas	81
4.3.1.	Energía del oscilador amortiguado	83
4.4.	Oscilaciones forzadas. Resonancia	85
5.	Ondas	95
5.1.	Estamos rodeados de ondas	96
5.1.1.	Tipos de ondas	96
5.2.	Función de la onda en una dimensión	97
5.3.	Ondas armónicas	98
5.4.	Ecuación de onda	102
5.5.	Velocidad de las ondas	103
5.5.1.	Ondas transversales en una cuerda	103
5.5.2.	Ondas elásticas en sólidos y líquidos	104
5.5.3.	Ondas elásticas en gases	106
5.6.	Energía y potencia de las ondas	108
5.6.1.	Ondas transversales	108
5.6.2.	Ondas longitudinales	111
5.7.	Sonido. Escala decibélica	112
5.8.	Ondas tridimensionales	113
5.9.	Efecto Doppler	115
5.10.	Ondas superficiales en un líquido	116
6.	Interferencia. Ondas estacionarias	125
6.1.	Introducción	126
6.2.	Pulsaciones	129
6.3.	Pulsos	131
6.4.	Ondas estacionarias	132
6.5.	Modos de vibración	134
6.6.	Superposición de ondas estacionarias. Análisis armónico	136

III Campos eléctricos y magnéticos	145
7. La interacción eléctrica	147
7.1. Carga eléctrica	148
7.2. Ley de Coulomb	148
7.3. Potencial electrostático	150
7.4. Ley de Gauss	152
7.5. El dipolo eléctrico	156
7.6. La interacción eléctrica y la constitución de la materia.	162
7.7. Conductores en equilibrio	165
7.7.1. Condensadores. Capacidad	166
7.7.2. Apantallamiento eléctrico	167
7.8. Dieléctricos	168
7.9. Energía del campo eléctrico	170
8. Corriente eléctrica	179
8.1. Densidad de corriente. Ley de Ohm	180
8.2. Efecto Joule	181
8.3. Conductividad eléctrica en sólidos, líquidos y gases	182
8.3.1. Filtros electrostáticos	184
8.4. Generadores de corriente	184
8.5. Circuitos de corriente continua. Resistencias en serie y en paralelo	187
8.6. La electricidad atmosférica	189
8.6.1. Tormentas	191
9. El campo magnético	199
9.1. Introducción	200
9.2. Campo magnético	201
9.3. Ley de Biot y Savart	201
9.4. Teorema de Ampère	202
9.5. Movimiento de cargas en un campo magnético	205
9.6. Momento dipolar magnético	207
9.7. El campo magnético en los medios materiales	209
9.7.1. Las corrientes internas de la materia. Paramagnetismo y diamagnetismo	209
9.7.2. Ferromagnetismo	212
9.8. El campo magnético terrestre	214

10.Inducción magnética	225
10.1. Ley de Faraday	226
10.2. Autoinducción	228
10.3. Circuitos de corriente alterna	229
10.4. Energía del campo magnético	231
10.5. Inducción entre circuitos. Transformadores	232
10.6. Diamagnetismo	233
10.7. Otras aplicaciones de la inducción	234
11.Campo electromagnético y radiación	241
11.1. Corriente de desplazamiento. Ecuaciones de Maxwell	242
11.2. Radiación	243
11.3. Ondas electromagnéticas	244
11.4. Polarización e Interferencia	247
11.5. El espectro electromagnético	248
11.6. Cuerpo negro	250
11.6.1. Radiación solar	252
11.6.2. Los rayos ultravioleta y la capa de ozono	254
IV Termodinámica	261
12.Propiedades termodinámicas de la materia	263
12.1. Estructura de la materia	264
12.2. Ecuación de estado de los gases ideales	265
12.3. Interpretación molecular de la temperatura y presión	268
12.4. Escalas termométricas	272
12.5. Energía interna	273
12.6. Capacidad calorífica	274
12.7. Dilatación, expansión	276
12.8. Mezclas de gases ideales	278
13.Equilibrio térmico y mecánico	285
13.1. Sistemas y equilibrio termodinámicos	286
13.2. Equilibrio entre subsistemas termodinámicos	287
13.3. Equilibrio mecánico	290
13.4. El transporte de la energía interna	290
13.4.1. Conducción térmica	291
13.4.2. Radiación	294

14. Equilibrio térmico en presencia de gravedad	305
14.1. Presión en gases: La atmósfera exponencial	306
14.2. Presión en líquidos	308
14.3. Principio de Arquímedes	309
15. Calor, trabajo y máquinas térmicas	317
15.1. Primer principio de la termodinámica	318
15.2. Trabajo hecho por un gas	319
15.3. Máquinas térmicas	324
16. Cambios de fase	333
16.1. Coexistencia líquido-vapor	334
16.2. Calor latente de vaporización	336
16.3. Transición líquido-vapor: visión microscópica	340
16.4. Tensión superficial y capilaridad	342
16.5. Otras transiciones de fase	347
V Física de fluidos	355
17. La dinámica de los fluidos	357
17.1. Equilibrio local	358
17.2. Cómo cambia la velocidad de un fluido	359
17.3. Cómo cambia la energía interna de un fluido	362
17.4. Cómo cambia la densidad de un fluido	363
18. Fluidos ideales y fluidos reales	369
18.1. Flujo laminar y turbulento: número de Reynolds	370
18.2. Capa límite	372
18.3. Fluidos ideales: Ecuación de Bernoulli	372
18.4. Fluido real en una tubería	375
18.5. Fuerza de arrastre	376
18.6. Convección	378
19. Termodinámica y dinámica de la atmósfera	385
19.1. Fuerzas en la atmósfera	386
19.2. Formación de brisas	388
19.3. Estabilidad en la atmósfera	389
19.4. El agua en la atmósfera	392
Bibliografía	398

Capítulo 4

Oscilaciones

OBJETIVOS DIDÁCTICOS ESPECÍFICOS

- Definir los conceptos de amplitud, periodo, frecuencia, frecuencia angular y fase de un movimiento oscilatorio.
- Escribir la ecuación de movimiento de un oscilador armónico simple.
- Calcular la energía cinética, potencial y total de un oscilador armónico en función del tiempo y del desplazamiento.
- Escribir y resolver la ecuación de movimiento de un oscilador armónico amortiguado.
- Calcular la energía disipada por un oscilador amortiguado. Definir y calcular el factor de calidad.
- Escribir y resolver la ecuación de movimiento de un oscilador armónico amortiguado y forzado.
- Definir el fenómeno de la resonancia. Interpretar una curva de resonancia y el papel que juega en ella la disipación.

4.1. Introducción

No hace falta buscar mucho para encontrar ejemplos cotidianos de oscilaciones. Sin ir más lejos, el habla es consecuencia de la vibración de las cuerdas vocales, y el sentido del oído se basa en la vibración de la membrana del tímpano. Las vibraciones, o mejor, la forma de evitarlas es un problema técnico de gran importancia en el diseño de puentes, edificios, máquinas, automóviles, etc. No es sólo cuestión de que puedan ser molestas para el usuario sino que pueden afectar a su propia seguridad. Pensemos, por ejemplo, en la fatiga del ala de los aviones o en un automóvil con amortiguadores en mal estado. La atmósfera, los mares y los continentes vibran en su conjunto bajo terremotos, explosiones volcánicas, etc.

En general, las oscilaciones se producen como reacción de un sistema que se encuentra en un estado de equilibrio estable al ser perturbado. Consideremos un sistema en un estado de equilibrio estable al que desplazamos ligeramente de su punto de equilibrio, el sistema experimenta una fuerza recuperadora que se opone al desplazamiento y que empuja al sistema hacia su posición de equilibrio. Pero si el sistema tiene inercia puede ocurrir que en su movimiento de regreso sobrepase el punto de equilibrio y se encuentre de nuevo alejado del equilibrio, de manera que el proceso se repite sucesivamente constituyendo una oscilación. En la figura 4.1 se dan varios ejemplos de sistemas mecánicos oscilantes, pero hay muchos otros y no sólo en mecánica. Así pues, se requieren dos ingredientes para que se produzca un

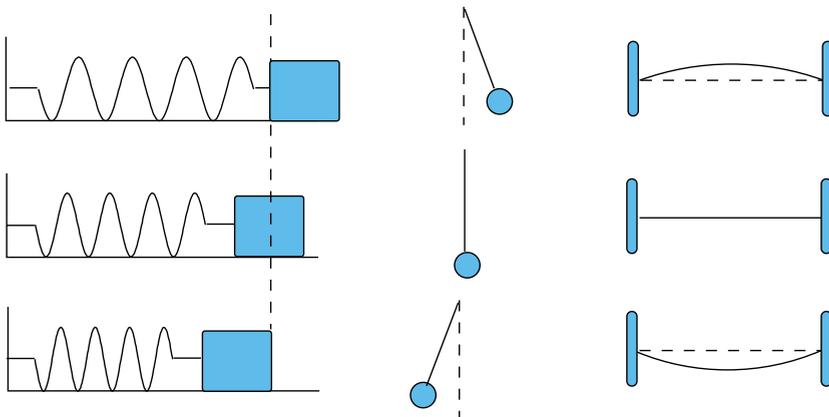


Figura 4.1: Una masa unida con un muelle, un péndulo y una cuerda tensa son ejemplos de sistemas oscilando. Cada uno de ellos está representado en tres posiciones, de las cuales la del centro corresponde al estado de equilibrio

movimiento oscilatorio: una fuerza recuperadora e inercia. Otro ingrediente que no es necesario pero que en la realidad casi siempre está presente es el amortiguamiento. Como veremos más adelante, para que haya oscilaciones el amortiguamiento tiene que ser lo bastante débil como para que el sistema en su recuperación sobrepase el punto de equilibrio.

4.2. Movimiento armónico simple

4.2.1. Ecuación de movimiento

El **movimiento armónico simple** es el tipo de oscilación más sencillo y se caracteriza porque la aceleración es proporcional a la posición. Un ejemplo de movimiento armónico simple es el de un cuerpo de masa m unido a un muelle que desliza sin rozamiento sobre un plano horizontal como se representa en la figura 4.2. Este sistema está en equilibrio cuando el muelle

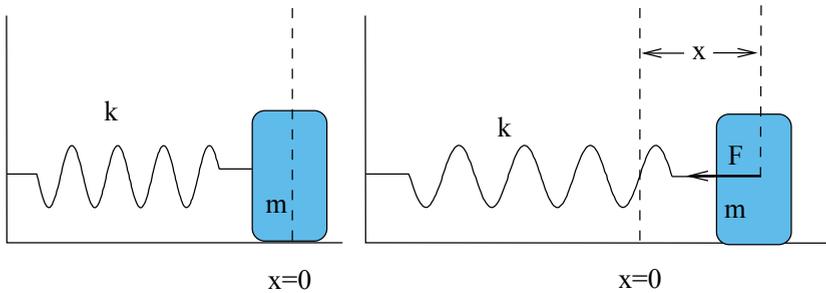


Figura 4.2: Cuerpo unido a un muelle que desliza sobre un plano horizontal. En la figura de la izquierda se encuentra en su posición de equilibrio y en la de la derecha con un desplazamiento o deformación del muelle x y sometido a una fuerza recuperadora F .

se encuentra sin deformar, $x = 0$, y en reposo. Si la masa se desplaza una distancia x de la posición de equilibrio el muelle se deforma y ejerce una fuerza elástica dirigida a lo largo del eje x proporcional a la deformación, **ley de Hooke**,

$$\vec{F} = -kx \vec{e}_x \tag{4.1}$$

donde k es la constante elástica del muelle y \vec{e}_x el vector unitario en la dirección del eje X . El signo menos indica que la fuerza es recuperadora, es decir, que se opone a la dirección del desplazamiento de manera que siempre trata de llevar el cuerpo hacia la posición de equilibrio. La deformación del muelle es la distancia x entre el centro de la masa en cada instante y su posición de equilibrio y puede ser positiva o negativa según que el muelle

esté estirado o comprimido. Como ésta es la única fuerza presente, podemos escribir la segunda ley de Newton como

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx. \quad (4.2)$$

El término de la izquierda, el producto de la masa por la aceleración, es el término de inercia y el de la derecha es el término elástico. Esta ecuación se puede escribir de la forma

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x, \quad (4.3)$$

que nos indica que la aceleración es proporcional al desplazamiento, condición que caracteriza el movimiento armónico simple.

En la figura 4.3 se muestra una forma de obtener experimentalmente la solución $x(t)$ de la ecuación (4.3). Es pues, razonable considerar que la solución $x(t)$ de la ecuación de movimiento sea de la forma:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \delta) \quad (4.4)$$

donde A , ω_0 y δ son constantes. Para ver si (4.4) es solución de (4.3) calcu-

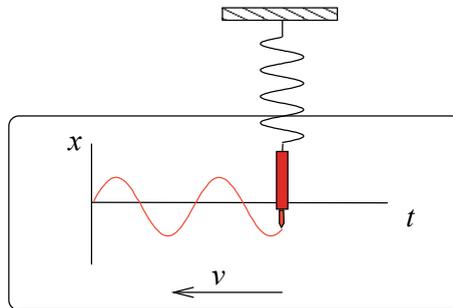


Figura 4.3: Si el papel se mueve con velocidad constante el lápiz dibuja el desplazamiento $x(t)$ de la masa en el tiempo. En este caso se ha tomado x positivo cuando el muelle se comprime.

lamos la primera y segunda derivada temporal de x

$$\frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \text{sen}(\omega_0 t + \delta) \quad (4.5)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \delta) \quad (4.6)$$

y sustituimos en (4.3) obteniendo que

$$-A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \delta) = -\frac{k}{m} A \cos(\omega_0 t + \delta). \quad (4.7)$$

Simplificando finalmente nos queda que

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (4.8)$$

Es decir, que la función (4.4) es solución de la ecuación (4.3) si se cumple (4.8).

La constante A , ver figura 4.4, es el desplazamiento máximo o **amplitud**. Al argumento del coseno, $(\omega_0 t + \delta)$, se llama **fase**, siendo δ la **constante de fase**. Tanto esta constante como la amplitud quedan determinadas por el valor de x y de v en el instante inicial $t = 0$. El significado de ω_0 se en-

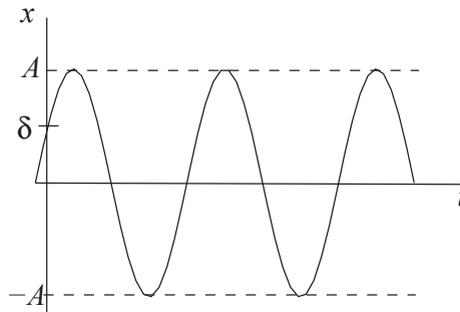


Figura 4.4: Posición x de la masa en función del tiempo. El máximo desplazamiento o amplitud A , el valor de la fase en $t = 0$ o constante de fase δ y el periodo T .

tiende fácilmente a partir de la definición del **período**, esto es, el tiempo T que transcurre entre dos máximos consecutivos de x . En efecto, si tenemos que

$$x(t) = x(t + T) = A, \quad (4.9)$$

se verifica que

$$\cos(\omega_0 t + \delta) = \cos(\omega_0 t + \omega_0 T + \delta) = 1 \quad (4.10)$$

lo que implica que $\omega_0 T = 2\pi$. Así pues,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.11)$$