
Contenido

Indice de tablas

Prefacio

1 Unidades, dimensiones y otros preliminares 1

1.1	Unidades	1	1.4	Notación científica y cifras significativas	6
1.2	Unidades fundamentales	3	1.5	Escalares y vectores	8
1.3	Unidades derivadas y análisis dimensional	4			

2 Cinemática en una dimensión 12

2.1	Introducción	12	2.2a	Velocidad	13
2.2	Movimiento rectilíneo	12	2.2b	Aceleración	16
			2.3	Aceleración uniforme	18

3 Cinemática en dos dimensiones; vectores 30

3.1	Introducción	30	3.4	Movimiento uniformemente acelerado en dos dimensiones	39
3.2	Suma y resta de vectores	31	3.5	Suma de velocidades; marcos de referencia	44
	3.2a Suma vectorial usando componentes ortogonales	33			
3.3	Vectores: desplazamiento, velocidad y aceleración	37			

4 Dinámica 55

4.1	Introducción	55	4.2c	Masa y peso	59
4.2	Las leyes de Newton sobre el movimiento	57	4.2d	La tercera ley	59
	4.2a La primera ley	57	4.3	Aplicación de las leyes de Newton	61
	4.2b La segunda ley	57	4.4	Fricción	70

5 Trabajo, energía y potencia 86

- | | | | |
|-----|--|------|--|
| 5.1 | Trabajo 86 | 5.4 | Conservación de la energía 95 |
| 5.2 | Energía cinética; teorema del trabajo-energía 89 | 5.4a | Fuerzas conservativas; energía mecánica 95 |
| 5.3 | Energía potencial y fuerzas conservativas 91 | 5.4b | Fuerzas conservativas y no conservativas 100 |
| | | 5.5 | Potencia 103 |

6 Impulso y cantidad de movimiento 117

- | | | | |
|-----|---|--------|---|
| 6.1 | Introducción 117 | 6.5 | Choques elásticos e inelásticos 122 |
| 6.2 | Fuerzas externas e internas 118 | 6.5a | Choques con movimiento en una dimensión 122 |
| 6.3 | Retorno a la segunda ley de Newton; cantidad de movimiento lineal 119 | * 6.5b | Choques con movimiento en dos dimensiones 126 |
| 6.4 | Conservación de la cantidad de movimiento 121 | 6.6 | Centro de masa 129 |

7 Movimiento circular 144

- | | | | |
|-----|--|-------|---|
| 7.1 | Cinemática del movimiento circular 144 | 7.3 | Dinámica del movimiento circular uniforme 149 |
| 7.2 | Relación entre movimiento de rotación y traslación 147 | * 7.4 | Aperaltamiento de curvas 153 |

8 Gravitación 163

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| 8.1 | Introducción 163 | 8.4 | Las leyes de Kepler del movimiento planetario 169 |
| 8.2 | Ley de la atracción gravitacional universal 164 | 8.5 | Determinación de G: "Pesando la Tierra" 171 |
| 8.3 | Energía potencial gravitacional; campo y potencia gravitacionales 166 | | |

9 Equilibrio rotacional; dinámica de cuerpos finitos 179

- | | | | |
|------|---|-----|------------------------------|
| 9.1 | Torques y equilibrio rotatorio 179 | 9.6 | Momento angular 191 |
| 9.2 | Centro de masa y centro de gravedad 184 | 9.7 | Giroscopios y bicicletas 197 |
| 9.3 | Dinámica de la rotación 187 | 9.8 | Energía cinética de giro 198 |
| 9.4 | Momento de inercia 188 | | |
| 9.4a | Teorema del eje paralelo 190 | | |

10 Propiedades mecánicas de la materia 213

- | | | | |
|-------|---|--------|--|
| 10.1 | Introducción 213 | 10.3c | Módulos de Young, cortante y de volumen 219 |
| 10.2 | Sólidos, líquidos y gases 214 | 10.4 | Tensión superficial 223 |
| 10.3 | Densidad y propiedades elásticas de los sólidos 216 | * 10.5 | Cohesión, adhesión, ángulo de contacto y capilaridad 226 |
| 10.3a | Densidad 216 | 10.5a | Caminando sobre el agua 228 |
| 10.3b | Deformación elástica y módulo elástico 217 | | |

11 Hidrostática e hidrodinámica 235

- | | | | | | | |
|------|---|---|------|---------------------|--|-----|
| 11.1 | Presión atmosférica | 235 | 11.5 | Efecto de Bernoulli | 249 | |
| 11.2 | Presión en un líquido | 240 | | 11.5a | Medidor venturi y atomizador | 253 |
| 11.3 | Flotación | 243 | | 11.6 | Flujo viscoso | 255 |
| | 11.3a | Determinación de la densidad por el principio de Arquímedes | 245 | 11.7 | Turbulencia | 259 |
| | 11.3b | Centro de flotación y la estabilidad de los botes | 247 | * 11.8 | Velocidad terminal, sedimentación y centrifugación | 260 |
| 11.4 | Hidrodinámica; flujo laminar y turbulento | 247 | | 11.8a | Sedimentación y centrifugación | 262 |

12 Propiedades térmicas, calorimetría y equivalente mecánico del calor 274

- | | | | | | | |
|------|--|-----|-------|---|----------------------|-----|
| 12.1 | Introducción | 274 | 12.5a | Capacidad calorífica y calor específico | 283 | |
| 12.2 | Temperatura | 277 | | 12.5b | Calor latente | 284 |
| 12.3 | Métodos termométricos | 278 | | 12.6 | Transmisión de calor | 289 |
| 12.4 | Expansión térmica | 281 | | 12.6a | Convección | 289 |
| 12.5 | Capacidad calorífica, calor latente y calorimetría | 283 | | 12.6b | Conducción | 292 |
| | | | | 12.6c | Radiación | 296 |

13 La ley del gas ideal y la teoría cinética 307

- | | | | | | |
|------|--------------------------------------|-----|--------|---------------------------------|-----|
| 13.1 | Introducción | 307 | 13.5a | Gases monoatómicos | 317 |
| 13.2 | Cantidades molares | 307 | 13.5b | Gases diatómicos | 320 |
| 13.3 | Ecuación de estado del gas ideal | 309 | * 13.6 | Mezclas de gases | 321 |
| 13.4 | Teoría cinética | 312 | 13.6a | Buceo y los mamíferos acuáticos | 323 |
| 13.5 | Capacidades caloríficas de los gases | 316 | | | |

14 Termodinámica 331

- | | | | | | |
|------|--|-----|--------|--|-----|
| 14.1 | Introducción | 331 | 14.4 | Máquinas térmicas | 341 |
| 14.2 | Las leyes cero y primera de la termodinámica | 332 | 14.5 | Entropía y la segunda ley | 342 |
| 14.3 | Segunda ley de la termodinámica | 337 | * 14.6 | Interpretación estadística de la entropía; extinción del calor | 345 |

15 Movimiento oscilatorio 357

- | | | | | | |
|------|---|-----|---------|---|-----|
| 15.1 | Introducción | 357 | 15.6 | El péndulo simple | 367 |
| 15.2 | Equilibrio estable, inestable e indiferente o neutro | 358 | 15.7 | Revisión del principio de equivalencia | 371 |
| 15.3 | Movimiento armónico simple | 359 | * 15.8 | El péndulo físico | 371 |
| 15.4 | Sistema de masa y resorte | 362 | 15.9 | Energía de un sistema oscilatorio | 372 |
| 15.5 | Relación del MAS y el movimiento circular; ecuaciones cinemáticas del MAS | 364 | * 15.10 | Oscilaciones forzadas; amortiguamiento y resonancia | 373 |

16 Ondas mecánicas 384

- | | | | | | |
|-------|---|-----|------|--|-----|
| 16.1 | Introducción | 384 | 16.4 | Reflexión de las ondas | 393 |
| 16.2 | Ondas sinusoidales o senoidales | 385 | 16.5 | Ondas estacionarias | 396 |
| 16.3 | Superposición de ondas | 390 | 16.6 | Resonancias | 397 |
| 16.3a | Superposición de dos ondas de longitud y amplitud idénticas | 390 | 16.7 | Trémolos | 398 |
| 16.3b | Superposición de ondas de distintas longitudes y amplitudes | 391 | 16.8 | Velocidad de propagación de las ondas en cuerdas | 399 |
| | | | 16.9 | Energía de una cuerda en vibración | 401 |

17 Sonido 409

- | | | | | | |
|-------|--|-----|---------|--------------------------------|-----|
| 17.1 | Introducción | 409 | 17.6 | Superposición de ondas sonoras | 416 |
| 17.2 | Generación del sonido | 410 | 17.6a | Resonancias acústicas en tubos | 416 |
| 17.3 | Velocidad del sonido | 410 | 17.6b | Interferencia | 420 |
| 17.4 | Relación entre las variaciones de presión y el desplazamiento promedio de las moléculas de gas | 412 | 17.7 | Efecto Doppler | 422 |
| 17.5 | Intensidad del sonido | 413 | 17.8 | Dispersión de ondas | 426 |
| 17.5a | Niveles de intensidad; decibeles | 414 | * 17.9 | El vuelo de los murciélagos | 427 |
| | | | * 17.10 | Fisiología de la audición | 427 |
| | | | 17.10a | Oído externo | 427 |
| | | | 17.10b | Oído medio | 428 |
| | | | 17.10c | Oído interno | 429 |

18 Electrostática: cargas, campos eléctricos y potenciales 437

- | | | | | | |
|------|---|-----|-------|--|-----|
| 18.1 | Introducción | 437 | 18.10 | Ley de Gauss | 454 |
| 18.2 | Origen de las cargas eléctricas | 438 | 18.11 | Campo eléctrico dentro de un conductor; blindaje | 455 |
| 18.3 | Conductores, aisladores y semiconductores | 439 | 18.12 | Potencial electrostático | 458 |
| 18.4 | Interacción entre cargas; ley de Coulomb | 440 | 18.13 | Potencial electrostático y la energía de cuerpos cargados | 460 |
| 18.5 | Aterrizado y carga por inducción | 444 | 18.14 | El electrón-volt | 460 |
| 18.6 | Dipolos inducidos y permanentes | 446 | 18.15 | Potenciales relacionados con un campo eléctrico uniforme y con el campo de una carga puntal; superficies equipotenciales | 462 |
| 18.7 | Fuerza electrostática debida a distribución de cargas | 447 | 18.16 | Potenciales ocasionados por la distribución de cargas | 470 |
| 18.8 | El campo eléctrico | 449 | | | |
| 18.9 | Líneas del campo eléctrico | 451 | | | |

19 Capacitores 486

- | | | | | | |
|------|--|-----|------|---|-----|
| 19.1 | Introducción | 486 | 19.4 | Capacitores en combinaciones en serie y en paralelo | 496 |
| 19.2 | Capacitores y capacitancia | 487 | | | |
| 19.3 | Energía electrostática de un capacitor; energía almacenada en un campo eléctrico | 492 | | | |

20 Corrientes eléctricas continuas 505

- | | | | |
|-------|---|---------|--|
| 20.1 | Fuentes de fuerza electromotriz; pilas y baterías 505 | 20.7 | La batería real; resistencia interna 522 |
| 20.2 | Corriente eléctrica 507 | 20.8 | Medición de corriente y voltaje 525 |
| 20.3 | Resistencia y resistividad 509 | 20.8a | Amperímetros 526 |
| 20.4 | Corriente, voltaje y disipación de potencia en un circuito sencillo 512 | 20.8b | Voltímetros 527 |
| 20.5 | Combinaciones de resistores 513 | 20.8c | Influencia de los medidores en un circuito 528 |
| 20.5a | Resistencias en serie 514 | 20.9 | Circuitos de puente 530 |
| 20.5b | Resistores en paralelo 515 | 20.9a | El puente de Wheatstone 530 |
| 20.5c | Combinaciones en serie-paralelo 517 | 20.9b | El potenciómetro 530 |
| 20.6 | Leyes de Kirchhoff 518 | * 20.10 | Conducción nerviosa 531 |

21 Magnetismo 546

- | | | | |
|-------|--|--------|--|
| 21.1 | Introducción 546 | 21.6b | Fuerza entre dos corrientes; definición del ampere 562 |
| 21.2 | El campo magnético 547 | 21.6c | Ley de Ampère 563 |
| 21.3 | Fuerza sobre una corriente en un campo magnético 550 | 21.6d | Espiras de corriente, toroides y solenoides 564 |
| 21.4 | El campo magnético terrestre 552 | * 21.7 | Materiales magnéticos 569 |
| 21.5 | Trayectoria de las cargas en movimiento dentro de un campo magnético 554 | * 21.8 | Medidores 570 |
| 21.5a | El ciclotrón 555 | | |
| 21.5b | Efecto de Hall 559 | | |
| 21.6 | Generación de campos magnéticos 561 | | |
| 21.6a | Campo magnético debido a un conductor recto infinitamente largo 561 | | |

22 Inducción electromagnética 580

- | | | | |
|------|---|--------|---|
| 22.1 | Introducción 580 | 22.4a | Inductancia mutua 586 |
| 22.2 | FEM inducidas; ley de Faraday y ley de Lenz 581 | 22.4b | Autoinductancia 587 |
| 22.3 | FEM de movimiento 584 | 22.5 | Energía almacenada en una inductancia 589 |
| 22.4 | Inductancia mutua y autoinductancia 586 | 22.6 | Generadores 591 |
| | | * 22.7 | Superconductividad y sus aplicaciones 592 |

23 Corrientes y voltajes dependientes del tiempo; circuitos de CA 605

- | | | | |
|-------|--|--------|---|
| 23.1 | Introducción 605 | 23.3 | Corrientes y voltajes alternos 614 |
| 23.2 | Respuesta de circuitos sencillos a discontinuidades de corriente o voltaje 606 | 23.3a | Circuito <i>RLC</i> ; resonancia 618 |
| 23.2a | Circuitos <i>RC</i> 606 | * 23.4 | Filtros 622 |
| 23.2b | Circuitos <i>RL</i> 611 | 23.5 | Transformadores 623 |
| | | * 23.6 | Efectos fisiológicos de las corrientes eléctricas 626 |

24 Ondas electromagnéticas y la naturaleza de la luz 634

24.1	Introducción	634	24.7	Ondas y rayos	648
* 24.2	Corriente de desplazamiento	635	24.7a	Principio de Huygens	649
24.3	Ondas electromagnéticas	636	24.8	Reflexión de ondas planas	650
24.4	Luz	643	24.9	Refracción	651
24.5	Velocidad de la luz	644	24.9a	Reflexión interna total	653
24.6	Índice de refracción	647	24.9b	Endoscopios	655
			24.9c	Dispersión	656

25 Óptica geométrica; instrumentos ópticos 665

25.	Espejos planos	655	* 25.5	Aberraciones	677
25.2	Espejos esféricos	667	25.6	El ojo	678
	25.2a Espejos cóncavos	667	25.7	Cámara y proyector	681
	25.2b Espejos convexos	671	25.8	Lente de aumento o lupa	683
25.3	Lentes	673	25.9	Microscopios	684
25.4	Rayos principales en las lentes y localización de imágenes	675	25.10	Telescopios	686

26 Óptica física 696

26.1	Introducción	696	* 26.4	Holografía	708
26.2	Coherencia	697	26.5	Difracción	710
26.3	Interferencia	698	26.5a	Rejilla de difracción	710
	26.3a Interferencia por rendija doble	699	26.5b	Difracción por una sola abertura	715
	26.3b Interferencia por película delgada	703	26.6	Poder de resolución	720
	26.3c Interferómetros	706	26.7	Polarización	722

* 27 Relatividad 736

27.1	Introducción	736	27.5	Adición de velocidades	
27.2	Relatividad clásica	738	27.6	Equivalencia de masa y energía	754
27.3	El experimento de Michelson-Morley	740	27.7	Confirmación experimental de la relatividad especial	755
27.4	Teoría especial de la relatividad	744	27.7a	Equivalencia masa-energía	755
	27.4a Postulados de la Teoría	744	27.7b	Dilatación del tiempo y contracción de las longitudes	756
	27.4b Simultaneidad y alargamiento del tiempo	746	27.8	Relatividad general	758
	27.4c La paradoja de los gemelos	749			
	27.4d La contracción de Lorentz-FitzGerald	751			

28 Orígenes de la teoría cuántica 764

28.1	Introducción	764	28.6	Efecto Compton	776
28.2	Radiación del cuerpo negro	766	28.7	Ondas de materia	777
28.3	El efecto fotoeléctrico	768	28.8	El principio de incertidumbre	780
28.4	Calor específico de los sólidos	771	28.9	Partículas y antipartículas	783
28.5	Los rayos X	772			

29 Estructura atómica y espectros atómicos 789

29.1	Introducción	789	29.6	Niveles atómicos de energía en un campo magnético	800
29.2	El modelo de Bohr para el átomo de hidrógeno	792	29.6a	Resonancia del spin del electrón	801
29.3	Emisión y absorción de radiación; diagrama de niveles de energía	794	29.7	El átomo de varios electrones y la tabla periódica	803
29.4	Las ondas de De Broglie y el modelo de Bohr	797	29.8	Líneas características de rayos X	807
29.5	Funciones de onda atómica, números cuánticos y estructura atómica	798	* 29.9	Másers y láseres	808

* 30 Conjuntos de átomos; moléculas y sólidos 816

30.1	Introducción	816	30.4b	Cristales covalentes	825
30.2	Uniones moleculares	817	30.4c	Enlaces metálicos	825
30.2a	Enlaces iónicos	817	30.5	Teoría de bandas de los sólidos	825
30.2b	Enlaces covalentes	819	30.5a	Cristales semiconductores	827
30.2c	Enlace de hidrógeno	820	30.6	Dispositivos semiconductores	829
30.2d	Enlace de Van der Waals	821	30.6a	Diodos de empalme	829
30.3	Espectros moleculares	821	30.6b	Transistores de empalme	830
30.4	Cohesión de los sólidos	824	30.6c	Dispositivos fotosensibles y dos emisores de luz (LEDs)	831
30.4a	Sólidos iónicos	824			

31 Física nuclear y partículas elementales 837

31.1	Introducción	837	31.5	Constantes de desintegración, vidas medias y actividades	854
31.2	Estructura nuclear y fuerzas nucleares	838	31.6	Reacciones nucleares	856
31.2a	Composición	838	31.7	Fisión	856
31.2b	Masa	839	31.8	Fusión	861
31.2c	Tamaño	840	* 31.9	Detectores de radiación	862
31.2d	La fuerza nuclear	841	* 31.10	Fechado radiactivo	865
31.2e	Spin nuclear	842	31.10a	Fechado con carbono 14	865
31.3	Resonancia magnética nuclear (RMN)	843	31.10b	Termoluminiscencia	867
31.4	Estabilidad de los núcleos	845	31.10c	Fechado con $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	868
31.4a	Energía de enlace	845	31.11	Partículas elementales	868
31.4b	Sistemática de la estabilidad	847	31.12	Teorías cuánticas de campo	871
31.4c	Radiactividad	848			
31.4d	Series de desintegración radiactiva	852			

Apéndices

A	Repaso de matemáticas	A-1		aceptados actualmente	A-11
B	Deducción del teorema del eje paralelo	A-8	E	Las unidades SI	A-13
C	Datos solares, terrestres y planetarios	A-10	F	Lista abreviada de isótopos	A-15
D	Valores de las constantes físicas fundamentales				

Respuestas a los problemas noes de opción múltiple A-20

Índice I-1