

## Contenido

Prefacio	VII
Objetivo del libro	VII
Cómo usar este libro	VIII
A mis colegas	XI
Encuadre filosófico	XI
Enfoque pedagógico adoptado en este libro	XII
Aprendizaje por inmersión en la física	XII
Agradecimientos	XV

### Capítulo 1

Rol del laboratorio en el aprendizaje de las ciencias	1
1.1 ¿Por qué hacemos experimentos?	2
1.2 Redacción de informes de laboratorio	5
1.3 Seguridad en el laboratorio	5
Referencias	6

### Capítulo 2

Introducción al análisis gráfico	7
2.1 Representación gráfica de resultados	8
2.2 Elección de las variables	10
2.3 Relación lineal	10
2.4 Relación potencial	10
2.5 Relación exponencial	13
2.6 Transformación de variables - pseudovariables	15
2.7 Sugerencias para generar gráficos	15
Ejercicios y problemas	17
Referencias	21

### Capítulo 3

Actividades de análisis gráfico	23
3.1 Leyes de escala	24
3.2 Análisis de resultados experimentales	26
Referencias	37

### Capítulo 4

Errores de medición - Incertidumbre del resultado de una medición	39
4.1 Introducción	40
4.2 Sensibilidad, precisión y exactitud	43
4.3 Fuente de errores	44
4.3.1 Errores introducidos por el instrumento	44
4.4 Clasificación de los errores	45
4.5 Cifras significativas	46
4.6 Determinación de los errores de medición	47
4.7 Nonio, vernier o calibre	48
Ejercicios y problemas	50
Referencias	52

### Capítulo 5

Tratamiento estadístico de datos	53
5.1 Introducción	54
5.2 Histogramas y distribución estadística	54
5.3 Parámetros de localización de una distribución	56
5.4 Parámetros estadísticos de dispersión- desviación estándar	58
5.4.1 Distribución normal o gaussiana	58
5.5 Magnitud que se mide N veces	59
5.6 Número óptimo de mediciones	61
5.6.1 Decálogo práctico	62
5.7 ♣Combinación de mediciones independientes	62
5.8 Discrepancia	63
Ejercicios y problemas	65
Histogramas	66
Objetivo	66
Introducción	66
Referencias	67

### Capítulo 6

Mediciones indirectas	69
6.1 Introducción - Propagación de incertidumbres	70
6.2 Truncamiento de números	72
6.3 Elección de los instrumentos	73
6.4 ♣♣Propagación de incertidumbres con variables correlacionadas	74
Ejercicios y problemas	76
Referencias	78

### Capítulo 7

Métodos cuantitativos y regresión lineal	79
7.1 Métodos cuantitativos y regresión lineal	80
7.1.1 Correlación y causalidad	84
7.1.2 Incerteza en los parámetros de ajuste	84
7.1.3 La navaja de Occam o criterio de parsimonia	85
Ejercicios y problemas	88
Referencias	91

### Capítulo 8

Experimentos simples de metrología y análisis de datos. I - Medición de densidades	93
8.1 Principio de Arquímedes	94
8.2 Viaje al interior de la Tierra	98
Referencias	100

### Capítulo 9

Experimentos introductorios de mecánica	101
9.1 Introducción	102
9.2 Experimento de caída libre: Física aristotélica	105
9.3 Experimento	106

Anexo A. Ecuación de movimiento del péndulo simple	112	● Oscilador armónico con fuerza de roce turbulento	182
Referencias	114	Referencias	184
<b>Capítulo 10</b>		<b>Capítulo 16</b>	
<b>La cámara digital como instrumento de medición en el laboratorio</b>	115	<b>Péndulos físicos</b>	185
10.1 Introducción	116	16.1 Introducción	186
10.2 Formas geométricas formadas por la sombra de una lámpara	119	16.1.1 Período para pequeñas amplitudes	187
10.3 Fuerza viscosa en el aire	122	16.1.2 Ejercicios preliminares	188
Anexo A. Régimen laminar y turbulento	128	16.2 Péndulo no intuitivo	189
Anexo B. Movimiento de caída en un medio fluido con roce proporcional a $v^2$	130	16.2.1 Ejercicios preliminares	190
Referencias	131	16.3 Péndulo reversible de Kater	191
<b>Capítulo 11</b>		Anexo A. Período de un péndulo simple para grandes amplitudes	194
<b>La tarjeta de sonido de una PC como instrumento de medición</b>	133	Referencias	195
11.1 Tarjeta de sonido de las computadoras personales	134	<b>Capítulo 17</b>	
11.2 Ondas sonoras	137	<b>Péndulo cicloidal - Braquistócrona y tautócrona</b>	197
11.3 Actividad	140	17.1 Introducción	198
Referencias	142	17.2 Evolutas e involutas	200
<b>Capítulo 12</b>		17.3 Arreglo experimental	201
<b>Medir el Sistema Solar desde el aula</b>	143	Referencias	205
12.1 Introducción	144	<b>Capítulo 18</b>	
Anexo A. Trayectoria de un rayo de luz en la atmósfera	159	<b>Oscilaciones forzadas - Resonancia</b>	207
Anexo B. Períodos de la Luna	160	18.1 Introducción	208
Referencias	162	Referencias	213
<b>Capítulo 13</b>		<b>Capítulo 19</b>	
<b>Sistemas elásticos - Ley de Hooke</b>	163	<b>Cadenas colgantes - Catenarias y parábolas</b>	215
13.1 Ley de Hooke	164	19.1 Introducción	216
Referencias	168	19.1.1 Ejercicios preliminares	219
<b>Capítulo 14</b>		Referencias	221
<b>Leyes de Newton y fuerza de rozamiento</b>	169	<b>Capítulo 20</b>	
14.1 Fuerza de roce seco de Coulomb	170	<b>Propiedades elásticas de los materiales - Módulo de rigidez - Flexión de barras</b>	223
Anexo A. Estudio del movimiento del sistema de dos cuerpos con roce seco	173	20.1 Propiedades eléctricas de los materiales	224
Referencias	174	20.2 ♣ Flexión de barras - Teoría de Euler-Bernoulli	228
<b>Capítulo 15</b>		20.2.1 ♣ Barra empotrada con un extremo libre	229
<b>Oscilaciones libres y amortiguadas</b>	175	20.2.2 Viga de peso despreciable empotrada con un extremo libre que sostiene un peso P	229
15.1 Introducción	176	20.2.3 Viga con carga distribuida uniformemente y empotrada un extremo libre	231
15.2 Oscilaciones libres	176	20.3 ♣ Vibraciones de una barra	231
15.3 Oscilaciones amortiguadas	177	20.3.1 ♣ Vibraciones de una barra con un extremo libre	232
Anexo A. Caso de fuerzas de roce dependiente del cuadrado de la velocidad - Roce turbulento	181	20.3.2 ♣ Vibraciones de una barra con ambos extremos libres	233
		Anexo A	238
		Anexo B. Momentos areales para distintas secciones transversales	239
		Referencias	240

<b>Capítulo 21</b>		25.2 Redes de resistencias en 1D - Relación de Fibonacci	296
<b>Dinámica de una cadena en movimiento</b>	241	25.3 Redes de resistencias en 2D	298
21.1 Cadena colgante del borde de una mesa o a través de un tubo	242	25.3.1 Modelo teórico	299
21.2 Cadena en caída vertical - Estudio del movimiento de un saltador <i>bungee</i>	245	Referencias	300
Referencias	250	<b>Capítulo 26</b>	
<b>Capítulo 22</b>		<b>Puente de Wheatstone</b>	301
<b>Sistemas mecánicos de masa variable - Materiales granulares</b>	251	26.1 Introducción	302
22.1 Materiales granulares	252	26.2 Puente de hilo	306
22.2 Flujo de materiales granulares	252	26.2.1 Precisión del puente de hilo	307
22.3 Divertimento: Experimento de la taza y la llave	259	26.2.2 ♣ Incertidumbres en las mediciones con puente de hilo	307
Anexo A. Máquina de Atwood con masas constantes	262	Preguntas de evaluación	308
Anexo B. Máquina de Atwood con masa variable	263	Referencias	309
Anexo C. Oscilador de masa variable	265	<b>Capítulo 27</b>	
Referencias	269	<b>Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin</b>	311
<b>Capítulo 23</b>		27.1 Determinación de resistencias de bajo valor	312
<b>Estabilidad de las rotaciones - Una paradoja divertida</b>	271	27.2 Método de las cuatro puntas o método de Kelvin	312
23.1 Introducción	272	27.3 Medición de la resistividad de una muestra de geometría simple-caso 1D	315
23.2 Modelo simplificado - Sistemas rotantes no inerciales	273	27.4 Determinación de la resistividad de una muestra bidimensional	316
23.3 Arreglo experimental	275	27.5 Método de van der Pauw - Transresistencias - Muestra plana	319
Anexo A. ♣♣ Descripción teórica de una barra en rotación	277	27.6 ♣ Muestra tridimensional grande, método de Wenner	321
Referencias	279	Referencias	322
<b>Capítulo 24</b>		<b>Capítulo 28</b>	
<b>Circuitos simples de corriente - Ley de Ohm</b>	281	<b>Variación de la resistencia eléctrica con la temperatura</b>	325
24.1 Dependencia de la corriente con la tensión - Ley de Ohm	282	28.1 Introducción	326
24.2 Construcción de un divisor de tensión	283	28.2 Modelo simple de conducción en sólidos	326
Ejercicio preliminar:	285	Preguntas	330
24.3 Curva V-I usando un sistema de adquisición conectado a una PC	287	Anexo A. ♣ Modelo simple de conducción en semiconductores	330
24.4 Entradas en modo común y diferenciales	288	Referencias	331
24.5 Circuitos equivalentes de una fuente - Teoremas de Thévenin y Norton	290	<b>Capítulo 29</b>	
Anexo A. ♣ Resistencia interna de voltímetros y amperímetros	292	<b>Conducción en líquidos - Estimación de la carga del electrón</b>	333
Referencias	294	29.1 Modelo simple de conducción en líquidos - Electrólisis	334
<b>Capítulo 25</b>		Referencias	337
<b>Redes de resistencias</b>	295		
25.1 Introducción	296		

<b>Capítulo 30</b>	
Condensadores y dieléctricos	339
30.1 Introducción	340
30.2 Capacímetros	341
Referencias	345
<b>Capítulo 31</b>	
Circuito RC	347
31.1 Circuito RC	348
31.2 Circuito RC excitado - Respuesta forzada	354
Anexo A. Determinación de la diferencia de fases entre dos señales	355
Referencias	357
<b>Capítulo 32</b>	
Fuerza de Lorentz y Ley de Ampère	359
32.1 Fuerza entre dos espiras circulares	360
Referencias	363
<b>Capítulo 33</b>	
Ley de Ampère y de Biot-Savart	365
33.1 Introducción	366
33.2 Sensor de efecto Hall	369
Referencias	374
<b>Capítulo 34</b>	
Ley de inducción de Faraday - Inducción mutua	375
34.1 Introducción	376
Referencias	384
<b>Capítulo 35</b>	
Autoinducción y circuito RL	385
35.1 Introducción	386
35.2 Autoinducción	386
35.3 Circuito RL - Respuesta transitoria	388
35.4 Circuito RL conectado a una fuente alterna	390
Estimación del valor de la autoinductancia de una espira circular	392
Anexo A. Estimación del valor de la autoinductancia de una bobina	391
Referencias	392
<b>Capítulo 36</b>	
Física de la caída de un imán permanente por un tubo	393
36.1 Introducción	394
36.2 Oscilación de un imán permanente en un campo uniforme	394
36.3 Determinación del momento magnético de un imán permanente	395
36.4 Pulsos inducidos por un imán al atravesar una espira	397
36.5 Caída de un imán por un tubo conductor	400
Referencias	403
<b>Capítulo 37</b>	
Campos y potenciales electrostáticos - Ecuación de Laplace	405
37.1 Introducción	406
37.2 Resolución numérica de la ecuación de Laplace, método de relajación	409
37.3 Condiciones de borde de Dirichlet y Neumann	410
Preguntas	413
Referencias	414
<b>Capítulo 38</b>	
Oscilaciones libres y forzadas de un circuito RLC	415
38.1 Oscilaciones libres	416
38.2 Diagrama de fase	417
38.3 Oscilaciones forzadas	418
38.4 Reactancias e impedancias complejas	420
38.5 ♣♣♣ Sistemas lineales	424
Referencias	427
<b>Capítulo 39</b>	
Circuitos acoplados	429
39.1 ♣♣♣ Oscilaciones acopladas: Circuitos RLC acoplados libres	430
39.2 ♣♣♣ Circuitos RLC acoplados forzados	432
Referencias	442
<b>Capítulo 40</b>	
Corrientes de Foucault o corrientes parásitas - Campos cuasiestacionarios en conductores	445
40.1 Introducción	446
40.2 ♣♣♣ Campos electromagnéticos cuasiestacionarios en conductores	446
40.3 Apantallamiento electromagnético - Simetría cilíndrica	448
40.4 Efecto piel o pelicular	456
Anexo A. Teoría del efecto piel o pelicular	463
Anexo B. Funciones de Bessel	465
Referencias	466
<b>Capítulo 41</b>	
Ondas estacionarias en una dimensión	467
41.1 Ondas estacionarias en una cuerda	468
41.2 Ondas estacionarias en tubos (Tubo de Kuntz)	470
Anexo A. Accionador mecánico de frecuencia variable	475
Anexo B. Ondas de presión	476
Referencias	477

<b>Capítulo 42</b>	
Interferencia de ondas acústicas - Batido	479
42.1 Principio de superposición	480
42.2 Batido	480
Referencias	484
<b>Capítulo 43</b>	
Caja cuadrada - Resonadores de Helmholtz	485
43.1 Ondas estacionarias en una caja cuadrada	486
43.2 Resonancia de una botella - Resonador de Helmholtz	489
Referencias	493
<b>Capítulo 44</b>	
Ondas de ultrasonidos	495
44.1 Ultrasonido	496
44.2 Par ultrasónico	497
44.3 Propiedades físicas de las ondas de ultrasonido	498
Reflexión de ondas	499
Referencias	501
<b>Capítulo 45</b>	
Efecto Doppler	503
45.1 Efecto Doppler - Introducción	504
45.2 Fuente en movimiento circular	506
Referencias	511
<b>Capítulo 46</b>	
Experimentos de óptica geométrica	513
46.1 Óptica geométrica- Leyes de la reflexión y refracción	514
46.2 Lentes delgadas	517
Referencias	523
<b>Capítulo 47</b>	
Experimentos de óptica física	525
47.1 Difracción e interferencia de la luz. La luz como fenómeno ondulatorio	526
47.2 Determinación de intensidad de un patrón	530
47.3 Polarización - Ley de Malus	533
Referencias	535
<b>Capítulo 48</b>	
Tensión superficial	537
48.1 Fuerzas de cohesión y adhesión	538
48.2 Ascenso capilar	539
Referencias	545
<b>Capítulo 49</b>	
Experimentos con fluidos - Experimento de Torricelli	547
49.1 Fluidos ideales y teorema de Bernoulli	548
49.2 Fluidos viscosos	548
49.3 Experimento de Torricelli	551
Anexo A. Tiempo de evacuación de un recipiente	557
Anexo B. Vena contracta	558
Anexo C. ♣♣♣ Teorema de Torricelli, modelo teórico	559
Referencias	562
<b>Capítulo 50</b>	
Termometría - Sensores de temperatura	563
50.1 Termómetros - Sensores de temperatura	564
Referencias	570
<b>Capítulo 51</b>	
Dilatación térmica de sólidos	571
51.1 Dilatación térmica	572
Referencias	574
<b>Capítulo 52</b>	
Experimentos de enfriamiento de un cuerpo - Decaimiento exponencial	575
52.1 Propagación del calor	576
52.2 Enfriamiento de un cuerpo	576
Referencias	580
<b>Capítulo 53</b>	
Conservación de la energía y calorimetría	581
53.1 Conservación de la energía - Primer Principio de la Termodinámica	582
53.2 Equivalente en agua del calorímetro	583
53.3 Transiciones de fases	587
Referencias	593
<b>Capítulo 54</b>	
Gases ideales - Determinación del peso molecular	595
54.1 Gases ideales	596
Referencias	602
<b>Capítulo 55</b>	
Teoría cinética de los gases - Relación de calores específicos para gases ideales	603
55.1 Teoría cinética y capacidad calorífica de gases ideales	604
55.2 Experimento de Clement-Desormes	605
55.3 Experimento de Rüchardt	608
Referencias	613
<b>Capítulo 56</b>	
Conducción y convección térmica - Ondas de calor	615
56.1 Temperaturas del pasado	616

56.2 Transmisión de calor .....	618	62.2 Coeficientes de absorción - Áreas de fotopicos .....	681
56.3 Ondas de calor en una dimensión .....	620	Referencias .....	685
56.3.1 Modelo I .....	620	<b>Capítulo 63</b>	
56.3.2 ♣♣ Ondas térmicas. Modelo II (tema opcional) .....	624	<b>Vida media del <math>^{40}\text{K}</math> - Nucleosíntesis</b> .....	687
56.4 Barra con enfriamiento lateral - Convección .....	629	63.1 Nucleosíntesis .....	688
Anexo A. Propiedades térmicas de materiales .....	632	63.2 Espectroscopía de rayos gamma .....	690
Referencias .....	633	63.3 Eficiencia de un detector de rayos gamma .....	690
<b>Capítulo 57</b>		63.4 Determinación de vidas medias largas .....	691
<b>Difusión</b> .....	635	Referencias .....	694
57.1 Leyes de Fick de la difusión .....	636	<b>Capítulo 64</b>	
57.2 Difusión en una y dos dimensiones .....	637	<b>Determinación de la banda de energía prohibida de semiconductores</b> .....	695
57.3 Difusión en agua .....	638	64.1 Banda de energía prohibida de semiconductores .....	696
Referencias .....	642	64.2 Diodos semiconductores .....	696
<b>Capítulo 58</b>		Referencias .....	700
<b>Experimento de Michelson</b> .....	643	<b>Capítulo 65</b>	
58.1 El interferómetro de Michelson .....	644	<b>Capacidad calorífica de un sólido a bajas temperaturas - Modelos de Einstein y de Debye</b> .....	701
Referencias .....	650	65.1 Capacidad calorífica de un sólido a bajas temperaturas .....	702
<b>Capítulo 59</b>		65.2 Efecto Leidenfrost .....	708
<b>Materiales ferromagnéticos - Transiciones de fase</b> .....	651	Referencias .....	710
59.1 Materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos .....	652	<b>Capítulo 66</b>	
59.2 Curva de histéresis .....	653	<b>Estimación de la constante solar, la luminosidad del Sol y la atenuación de la luz en la atmósfera</b> .....	711
59.3 Determinación de la curva de histéresis .....	654	66.1 La luminosidad del Sol y la constante solar .....	712
Anexo A. Número de vueltas de las bobinas del toroide .....	659	66.2 Extinción de la luz en la atmósfera .....	713
Anexo B. Circuito integrador .....	660	66.3 Determinación de la irradiancia solar .....	716
Referencias .....	661	66.4 ♣ Calefacción de una placa expuesta al Sol .....	719
<b>Capítulo 60</b>		66.5 Máxima distancia de visibilidad en el aire, turbidez .....	722
<b>Naturaleza estadística del decaimiento radioactivo</b> .....	663	Anexo A. Fotómetros .....	726
60.1 Decaimientos radioactivos .....	664	Calibración .....	727
60.2 La distribución de Poisson .....	664	Referencias .....	728
Referencias .....	667	<b>Apéndice A</b>	
<b>Capítulo 61</b>		<b>Pautas y sugerencias para la redacción de informes científico - técnicos</b> .....	729
<b>Dinámica relativista - Colisiones de fotones y electrones - Efecto Compton</b> .....	669	A.1 Introducción .....	730
61.1 Cinemática relativista .....	670	A.2 Organización del informe - Formato .....	731
61.2 Interacción de la radiación con la materia. Efecto Compton .....	671	Encabezamiento del informe .....	731
61.3 Mecanismos de interacción de fotones en un detector de rayos gamma .....	673	Cuerpo del informe .....	731
Referencias .....	678	A.3 Comentarios adicionales .....	734
<b>Capítulo 62</b>		Ejemplo de informe técnico .....	736
<b>Interacción de la radiación electromagnética con la materia</b> .....	679	Resumen .....	736
62.1 Pasaje de la radiación electromagnética por la materia .....	680	Introducción .....	736
		Materiales y método, descripción del experimento .....	736

Resultados y discusión .....	736	C.1 Regresión lineal - Datos con errores .....	746
Conclusiones .....	737	C.2 Significación estadística de parámetros de un ajuste .....	749
Referencias .....	737	Referencias .....	750
<b>Apéndice B</b>		<b>Apéndice D</b>	
<b>Normas y recomendaciones de seguridad en los laboratorios</b> .....	739	<b>Método de cuadrados mínimos - Caso no lineal</b> .....	751
B.1 Introducción .....	740	D.1 Método de cuadrados mínimos en relaciones no lineales .....	752
B.2 Recomendaciones generales .....	740	D.2 Estimación de las incertidumbres de los parámetros del modelo .....	753
B.3 Cuidados y recomendaciones personales .....	740	D.3 Simulación de resultados experimentales - Método de Montecarlo .....	754
B.4 Recomendaciones generales para el uso de un láser .....	741	Referencias .....	755
B.5 Recomendaciones generales para usar líquidos criogénicos .....	741	<b>Apéndice E</b>	
B.6 Normas generales para usar productos químicos .....	742	<b>Lock-in amplifier</b> .....	757
B.7 Normas generales para usar sustancias radiactivas .....	742	E.1 El lock-in amplifier .....	758
Referencias .....	743	Referencias .....	761
<b>Apéndice C</b>		<b>Índice temático</b> .....	763
<b>Correlación lineal - Significación de parámetros</b> .....	745		